

中华人民共和国国家军用标准

FL 0109

GJB 150.18A—2009
代替 GJB 150.18—1986

军用装备实验室环境试验方法
第18部分：冲击试验

Laboratory environmental test methods for military materiel—— Part 18: Shock test

2009—05—25 发布　　2009—08—01 实施

中国人民解放军总装备部　批 准

目　次

前　言

GJB 150《军用装备实验室环境试验方法》分为28个部分：

a) 第1部分：通用要求；
b) 第2部分：低气压(高度)试验；
c) 第3部分：高温试验；
d) 第4部分：低温试验；
e) 第5部分：温度冲击试验；
f) 第7部分：太阳辐射试验；
g) 第8部分：淋雨试验；
h) 第9部分：湿热试验；
i) 第10部分：霉菌试验；
j) 第11部分：盐雾试验；
k) 第12部分：砂尘试验；
l) 第13部分：爆炸性大气试验；
m) 第14部分：浸渍试验；
n) 第15部分：加速度试验；
o) 第16部分：振动试验；
p) 第17部分：噪声试验；
q) 第18部分：冲击试验；
r) 第20部分：炮击振动试验；
s) 第21部分：风压试验；
t) 第22部分：积冰/冻雨试验；
u) 第23部分：倾斜和摇摆试验；
v) 第24部分：温度－湿度－振动－高度试验；
w) 第25部分：振动－噪声－温度试验；
x) 第26部分：流体污染试验；
y) 第27部分：爆炸分离冲击试验；
z) 第28部分：酸性大气试验；
aa) 第29部分：弹道冲击试验；
bb) 第30部分：舰船冲击试验。

本部分为GJB 150的第18部分，代替GJB 150.18－1986《军用设备环境试验方法　冲击试验》。

本部分与GJB 150.18－1986相比，有下列主要变化：

a) 删除了GJB 150.18－1986中的“试验条件”，增加了确定试验方法、试验顺序、试验程序和试验条件的剪裁指南；
b) 增加了对试验信息的要求；
c) 增加了四个附录；
d) 扩充和细化了程序步骤；
e) 将试验七、试验八和试验十的有关内容分离变为独立的试验方法；
f) 将试验九的内容按剪裁处理；

g) 取消了基本设计试验中的半正弦冲击脉冲波形。

本部分附录A、附录B、附录C和附录D均为规范性附录。

本部分由中国人民解放军总装备部电子信息基础部提出。

本部分起草单位：北京航空航天大学、航天科技集团公司一院702所、航天科技集团公司五院511所、中国航空综合技术研究所。

本部分主要起草人：李传日、袁宏杰、王德言、夏益霖、刘　斌、王朝贵、董　欣、徐　明。

军用装备实验室环境试验方法
第18部分：冲击试验

1 范围

本部分规定了军用装备实验室冲击试验的目的与应用、剪裁指南、信息要求、试验要求、试验过程和结果分析的内容。

本部分适用于对军用装备进行冲击试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本部分的条款。凡是注明日期或版次的引用文件，其后的任何修改单(不包括勘误的内容)或修订版本都不适用于本部分，但提倡使用本部分的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡是不注明日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本部分。

GJB 150.1A－2009　军用装备实验室环境试验方法　第1部分：通用要求

GJB 150.15A－2009　军用装备实验室环境试验方法　第15部分：加速度试验

GJB 150.16A－2009　军用装备实验室环境试验方法　第16部分：振动试验

GJB 150.20A－2009　军用装备实验室环境试验方法　第20部分：炮击振动试验

GJB 573A－1998　引信环境与性能试验方法

GJB 4239　装备环境工程通用要求

3 目的与应用

3.1 目的

本试验的目的在于：

a) 评估装备的结构和功能承受装卸、运输和使用环境中不常发生的非重复冲击的能力；

b) 确定装备的易损性，用于包装设计，以保护装备结构和功能的完好性；

c) 测试装备固定装置的强度，该装备安装在可能发生碰撞的平台上。

3.2 应用

本试验适用于评估装备在其寿命期内可能经受的机械冲击环境下的结构和功能特性。机械冲击环境的频率范围一般不超过10000Hz，持续时间不超过1.0s。多数机械冲击环境作用下，装备的主要响应频率不超过2000Hz，响应持续时间不超过0.1s。

3.3 限制

本试验不包括：

a) 由火工装置动作导致装备经受的冲击效应(这类冲击试验参见GJB 150.27－2009)。

b) 由高速局部撞击(如弹道冲击)导致装备经受的冲击效应(对这类冲击试验应根据试验数据专门设计，并参见GJB 150.29－2009)。

c) 舰载装备经受的强冲击效应(按舰船冲击试验方法相关标准进行舰载装备的冲击试验)。

d) 引信系统经受的冲击效应(按GJB 573A－1998进行引信及其部件的安全性和功能冲击试验)。

e) 由于受到高压波冲击(如炮击使装备表面受到的压力波冲击)而导致装备经受的冲击效应(对于这类冲击试验和其导致的装备响应，应根据试验数据专门设计，并参见GJB 150.20A－2009)。

f) 大型展开的装备(如建筑管网分布系统)受到的冲击效应。这种装备的各部分会经受不同且不相关联的冲击(对于这类冲击试验，应根据试验数据专门设计)。

g) 在高低温下进行冲击试验的特殊规定。如果没有特殊要求，试验一般在室温下进行。但是，本部分的内容有助于高低温环境下冲击试验的设计和实施。

h) 由于试验设备或其他故障而引起试验意外中断的有关工程指南。(如果在冲击脉冲输入期间发生中断，一般应重新输入这个冲击脉冲，但应确认由中断的冲击脉冲而引起的应力不会造成随后的试验结果无效。在继续试验前，应对所有试验设备上因中断产生的数据进行记录并作分析。另外，要对装备进行检查，以保证冲击试验前装备的完好性)。

4 剪裁指南

4.1 选择试验方法

4.1.1 概述

分析有关技术文件的要求，应用装备(产品)订购过程中实施 GJB 4239 得出的结果，确定装备寿命期内冲击环境出现的阶段，根据下列环境效应确定是否需要进行本试验。当确定需要进行本试验，且本试验与其他环境试验使用同一试件时，还需确定本试验与其他试验的先后顺序。

4.1.2 环境效应

通常，冲击可能对整个装备的结构和功能完好性产生不利影响。不利影响的程度一般随冲击的量级和持续时间的增减而改变。当冲击持续时间与装备固有频率的倒数一致或者输入冲击环境波形的主要频率分量与装备的固有频率一致时，会增加对装备结构和功能完好性的不利影响。

装备对机械冲击环境的响应具有以下特征：高频振荡、短持续时间、明显的初始上升时间和高量级的正负峰值。机械冲击的峰值响应一般可用一个随时间递减的指数函数包络。对于具有复杂多模态特性的装备，其冲击响应包括以下两种频率响应分量：施加在装备上的外部激励环境的强迫频率响应分量和在激励施加期间或之后装备的固有频率响应分量。这些响应会导致：

a) 零件之间摩擦力的增加或减少，或相互干扰而引起的装备失效；

b) 装备绝缘强度变化、绝缘电阻抗下降、磁场和静电场强的变化；

c) 装备电路板故障、损坏和电连接器失效(有时，装备在冲击作用下，可能使电路板上多余物移位而导致短路)；

d) 由于装备结构或非结构件的过应力引起装备的永久性机械变形；

e) 由于超过极限强度导致装备机械零件的损坏；

f) 材料加速疲劳(低周疲劳)；

g) 装备潜在的压电效应；

h) 由于晶体、陶瓷、环氧树脂或玻璃封装破裂引起的装备失效。

4.1.3 选择试验顺序

4.1.3.1 一般要求

见 GJB 150.1A—2009 中的 3.6。

4.1.3.2 特殊要求

与其他试验共同使用同一试件时的试验顺序取决于试验的类型(例如研制试验、鉴定试验、耐久性试验等)，以及试件的通用性。一般情况下，在试验程序中应尽早安排冲击试验，但应在振动试验之后。具体要求如下：

a) 如果冲击环境特别严酷，且装备在主要结构或功能不失效的情况下，通过试验的可能性较小时，则应在试验序列中首先安排冲击试验。这样在进行其他的环境试验前，能够对装备进行重新设计以满足冲击技术要求，并能节省费用。

b) 如果冲击环境虽然严酷，但装备在主要结构或功能不失效情况下，通过试验的可能性较大时，则应在振动和温度试验之后进行冲击试验，这样可以暴露振动、温度和冲击组合环境下的故障。

c) 如果冲击试验量级没有振动试验量级严酷，可以从试验序列中删除冲击试验。

d) 在气候试验之前进行冲击试验通常是有利的(如果此顺序代表了实际的使用条件)。试验经验表明，在进行冲击试验后，往往能更加清晰地显示出装备对气候敏感的缺陷。但是，内部或外部的热应力会永久地削弱装备耐振动和冲击的能力，如果冲击试验在气候试验之前进行，就不能检测到这些缺陷。

4.2 选择试验程序

4.2.1 概述

本试验包括八个试验程序：

a) 程序 I——功能性冲击；
b) 程序 II——需包装的装备；
c) 程序 III——易损性；
d) 程序 IV——运输跌落；
e) 程序 V——坠撞安全；
f) 程序 VI——工作台操作；
g) 程序 VII——铁路撞击；
h) 程序 VIII——弹射起飞和拦阻着陆。

4.2.2 选择试验程序考虑的因素

应根据试验要求，考虑装备在寿命期(包括后勤保障和工作状态)内所有预期的冲击环境，确定使用的试验程序、程序的组合以及程序的顺序。当选择试验程序时，应考虑下列内容：

a) 装备的用途。根据技术文件要求，确定装备在冲击前、冲击期间和冲击后的工作或功能。
b) 经受的环境。程序 I～程序 VII 是指由于装备或装备的支撑结构与其他物体之间动量交换导致的单次冲击。程序 VIII 中的弹射起飞包含了由两个冲击组成的序列，这两个冲击由一个持续时间相对较短的振动(例如瞬态振动)来分隔。程序 VIII 中的拦阻着陆可认为在一个单次冲击之后紧跟一个瞬态振动。
c) 数据要求。要求记录试验环境数据和用于验证装备试验前、试验期间、试验后性能的试验数据。
d) 试验的顺序。见 4.1.3。

4.2.3 各程序的差别

4.2.3.1 程序 I——功能性冲击

对处在工作状态下的装备(包括机械的、电气的、液压的和电子的)进行冲击试验，以评估在冲击作用下装备的结构完好性和功能一致性。通常，要求装备在冲击作用期间能工作，并且要求装备在实际使用期间可能遇到那些典型冲击作用时不受损坏。

4.2.3.2 程序 II——需包装的装备

用于需要集装箱运输的装备。它将最小临界抗冲击能力规定为装卸跌落高度，为包装设计人员提供设计依据。该程序不能用于极易损坏装备(如导弹制导系统、精确校准试验设备、陀螺和惯性制导平台等)的试验。对特别易损的装备，其抗冲击能力的量化应考虑采用程序 III。

4.2.3.3 程序 III——易损性

用于确定装备的易损性量级，为装备包装设计或重新设计装备提供依据，以满足运输或搬运要求。该程序用于确定装备的临界冲击条件，在临界冲击条件下装备的结构和功能有可能降级。如果要获得更实际的极限能力，该程序应在极限环境温度下进行。

4.2.3.4 程序 IV——运输跌落

用于确定装备是否能经受住正常装卸所引起的冲击，这些装备通常搬入或搬出运输箱或组合箱内外，或供外场使用(靠人力、卡车、火车等运到战场)。这类冲击是偶然的，但可能削弱装备的功能。该程序不适用于正常后勤运输环境中所遇到的冲击，如集装箱内的装备经受的并在装备寿命周期剖面中确定的冲击(见程序 II——需包装的装备)。

4.2.3.5 程序V——坠撞安全

用于安装在空中及地面运载工具上的装备，在坠撞中装备可能从安装夹具、系紧装置或箱体结构上脱离，危及人员安全。该程序验证在模拟的坠撞条件下，装备的安装夹具、系紧装置或箱体结构的结构完好性。本程序也验证装备整体结构的完好性，如在冲击作用下装备的零部件不会弹出。本程序不适用于作为货物运输的装备，这些装备应按 GJB 150.15A－2009 或 GJB 150.16A－2009 进行。

4.2.3.6 程序VI——工作台操作

用于需在工作台上操作、维护或包装的装备。该程序用于确定装备是否能够承受在典型的工作台上操作、维护、包装中产生的冲击。这类冲击可能在装备维修期间内遇到。本程序也可应用于有伸出部件的装备试验，由于有伸出部件，即使整个装备未受冲击，装备也极易受损。这种试验应特别注意装备伸出部件的结构在工作台上操作、维护或包装时受损的情况。本程序适用于从装在最长边大于 23cm 的运输箱中搬出的装备。而对于小于该尺寸的装备一般按程序IV(运输跌落)在较高量级上进行试验。

4.2.3.7 程序VII——铁路撞击

用于由铁路运输的装备试验。该程序用于验证在铁路运输中常规铁路车辆撞击时，装备的结构完好性，评估系紧系统和系紧程序的适用性。如果对装备的运输要求没有专门的规定，所有装备应在最大额定总重量(满负载)下试验。该程序不适用于小的、单独包装的、通常安装在货架上或作为大型装备的一部分来运输(或试验)的装备试验。

4.2.3.8 程序VIII——弹射起飞和拦阻着陆

用于安装在经受弹射起飞和拦阻着陆的固定翼飞机内或上的装备。对于弹射起飞，装备首先经受一个初始冲击，紧接着经受一个有一定持续时间的低量级的瞬态振动，该振动的频率与安装平台最低频率分量相近，最后依据弹射程序再经受一个冲击。对于拦阻着陆，装备会经受一个初始冲击，紧接着经受一个具有一定持续时间的低量级的瞬态振动，该振动的频率与安装平台最低频率分量相近。

4.3 确定试验条件

4.3.1 概述

选定本试验和相应程序后，还应根据有关文件的规定和为该程序提供的信息，选定该程序所用的试验条件和试验技术。确定试验参数时应考虑 4.3.2～4.3.4 的内容。

4.3.2 一般考虑

有关冲击环境及冲击响应的描述见附录A。冲击响应的时域特征可用振幅和持续时间等来描述。冲击的有效持续时间有两种定义方式，推荐使用有效持续时间 T_e；冲击响应的频域特征可用冲击响应谱、能量谱和傅立叶谱等描述。冲击响应谱的定义也有数种，推荐使用最大绝对加速度冲击响应谱作为冲击响应的描述方法，最大伪速度的冲击响应谱作为次选方法。冲击试验一般测量输入的加速度冲击环境和装备的加速度响应，也可以测量装备的其他响应，如速度、位移、应变、力或压力等。

通常，如果对系统完好性的要求相当，在进行过任一足够严酷的随机振动试验的轴向上，就不需要再沿这些轴向进行任何冲击试验程序。如果有关标准规定装备要进行随机振动试验和冲击试验，根据规定的随机振动激励谱求得的单自由度系统的高斯 3σ 加速度响应谱，在指定的固有频率范围内每一处都超过根据规定的冲击激励求得的最大加速度冲击响应谱，则认为随机振动试验是足够严酷的，可用一个相对比较高量级的随机振动试验来替代相对较低量级的冲击试验。用于响应谱分析的 Q 值一般取 10，相当于 5%的临界粘性阻尼。随机振动试验的 3σ 冲击响应谱为单自由度系统的固有频率的函数，可由式(1)给出：

$$A(f)=3\left[\frac{\pi}{2}G(f)fQ\right]^{\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots(1)$$

式中：

$A(f)$——加速度冲击响应谱在频率f处的幅值；

$G(f)$——在频率f处的加速度谱密度值。

附录D中讨论了加速度谱密度量级和相应的冲击响应谱量级之间的关系。

4.3.3 确定试验的冲击响应谱和有效持续时间

4.3.3.1 概述

可根据装备工作环境所测的时间历程数据、相似动态环境测量数据的外推数据、预计数据，或这三种数据的综合进行统计处理，确定冲击响应谱SRS和有效持续时间T_e(见附录C)。为便于剪裁，应尽量在装备寿命期剖面内使用环境相似的条件下获取测量数据。推导出冲击响应谱SRS和有效持续时间T_e后，按数据获取的情况选用试验方法：

a) 有测量数据，用波形控制方式，通过振动台再现实测冲击波形；

b) 有测量数据，通过一个复杂瞬态过程合成冲击波形，该冲击的有效持续时间T_e与实测冲击的有效持续时间T_e近似，波形相似，峰值和过零点相似；

c) 没有测量数据，但以前的冲击响应谱估计可用，冲击波形可通过复杂瞬态过程来合成，有效持续时间T_e的确定要适当考虑装备的固有频率响应特性；

d) 没有测量数据，但可用经典脉冲的冲击复现冲击波形。只有在分析中能证实使用这些脉冲是合理时，才能使用经典脉冲。

4.3.3.2 有测量数据

试验的有效持续时间T_e通过对典型的冲击时间历程的分析来确定。T_e从冲击时间历程上第一个有效响应的点开始，一直延伸到由分析得到的有效持续时间或仪器系统的本底噪声中的较短值。试验要求的冲击响应谱通过分析计算确定。如果有效持续时间$T_e < \frac{1}{2f_{min}}$(其中f_{min}为冲击响应谱最低频率)，试验的有效持续时间T_e可延长到$\frac{1}{2f_{min}}$；至少在5Hz～2000Hz内，取$Q=10$，以1/12倍频程或更小的频率间隔，对交流耦合的时间历程进行冲击响应谱分析。按以下要求处理：

a) 当有足够数量的有代表性的冲击响应谱时，应使用适当的统计包络技术确定所要求的试验谱(见附录B)，试验的有效持续时间T_e取分析得到的T_e与$\frac{1}{2f_{min}}$两者的较大值。

b) 当没有足够的数据可用于统计分析时，考虑到冲击环境的随机性和所用预计方法的不确定性，应根据有理论依据的工程判断，在所得的最大谱值上再增加一定裕量来确定所要求的试验谱。依据试验量级期望的保守程度(见B.4.2)，通常对估计的冲击响应谱包络增加3dB或6dB的裕量。试验的有效持续时间T_e应取分析得到的T_e与$\frac{1}{2f_{min}}$两者的较大值。

4.3.3.3 没有测量数据

如果没有测量的数据，对于程序I——功能性冲击和程序V——坠撞安全可使用图1中的合适的谱作为每个轴向的试验谱，而且冲击时间历程的持续时间T_e应在表1中给出的值之间，图1给出的谱与后峰锯齿脉冲的冲击响应谱相似。推荐的冲击波形合成方法有两个：一个是有限个指定频率的衰减正弦波的叠加；另一个是有限个指定频率的调幅正弦波(小波)的叠加。这种波形的冲击响应谱与图1的冲击响应谱相似，冲击波形的持续时间是表1提供的T_e的最大值。只要瞬态脉冲的响应谱在5Hz～2000Hz频率范围内等于或超过图1给出的谱，且持续时间满足要求，就可采用作为冲击波形。采用经典后峰锯齿脉冲和梯形脉冲是在没有测量数据情况下最低可接受的选择。

表 1　没有测量数据时使用的试验冲击响应谱

试验程序	峰值加速度 g	T_e ms	频率折点 Hz
飞行器设备功能性试验	20	15—23	45
地面设备功能性试验	40	15—23	45
飞行器设备坠撞安全试验	40	15—23	45
地面设备坠撞安全试验	75	8—13	80

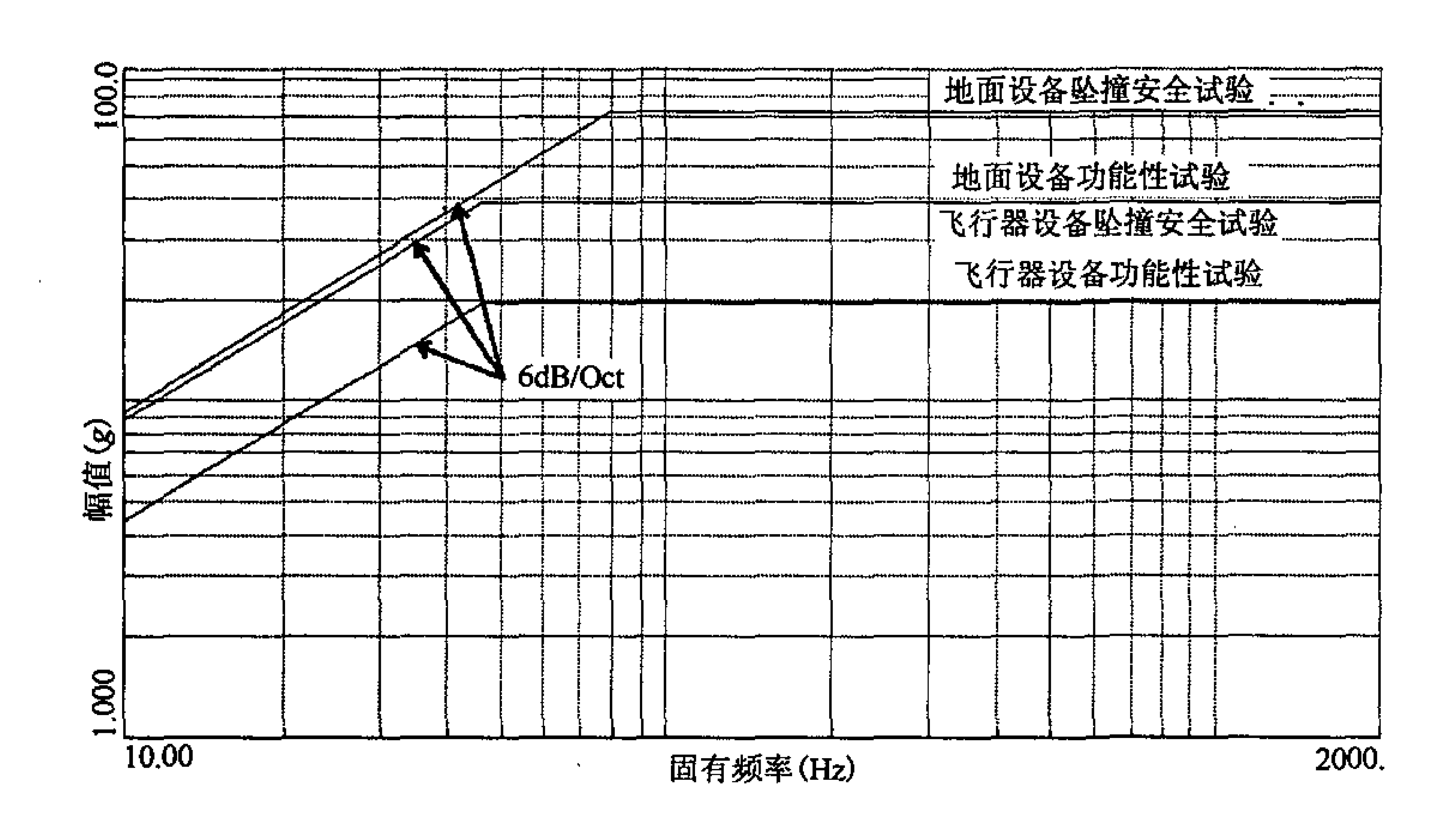


图 1　没有测量数据时使用的冲击响应谱

如果规定装备除了进行冲击振动试验外还需进行随机振动试验，在试验剪裁时，有可能用随机试验替代冲击试验。在程序 I——功能性冲击中就有一个这种剪裁的例子，图 2 提供了两条加速度谱密度曲线，用来与特定的加速度谱密度试验环境进行比较，以确定随机振动是否足够严酷到能替代测量的或规定的冲击量级。从这些平稳随机环境加速度谱密度曲线演变而来的冲击响应谱包络了图 1 中相应的冲击响应谱。对此的有关试验验证见附录 D。

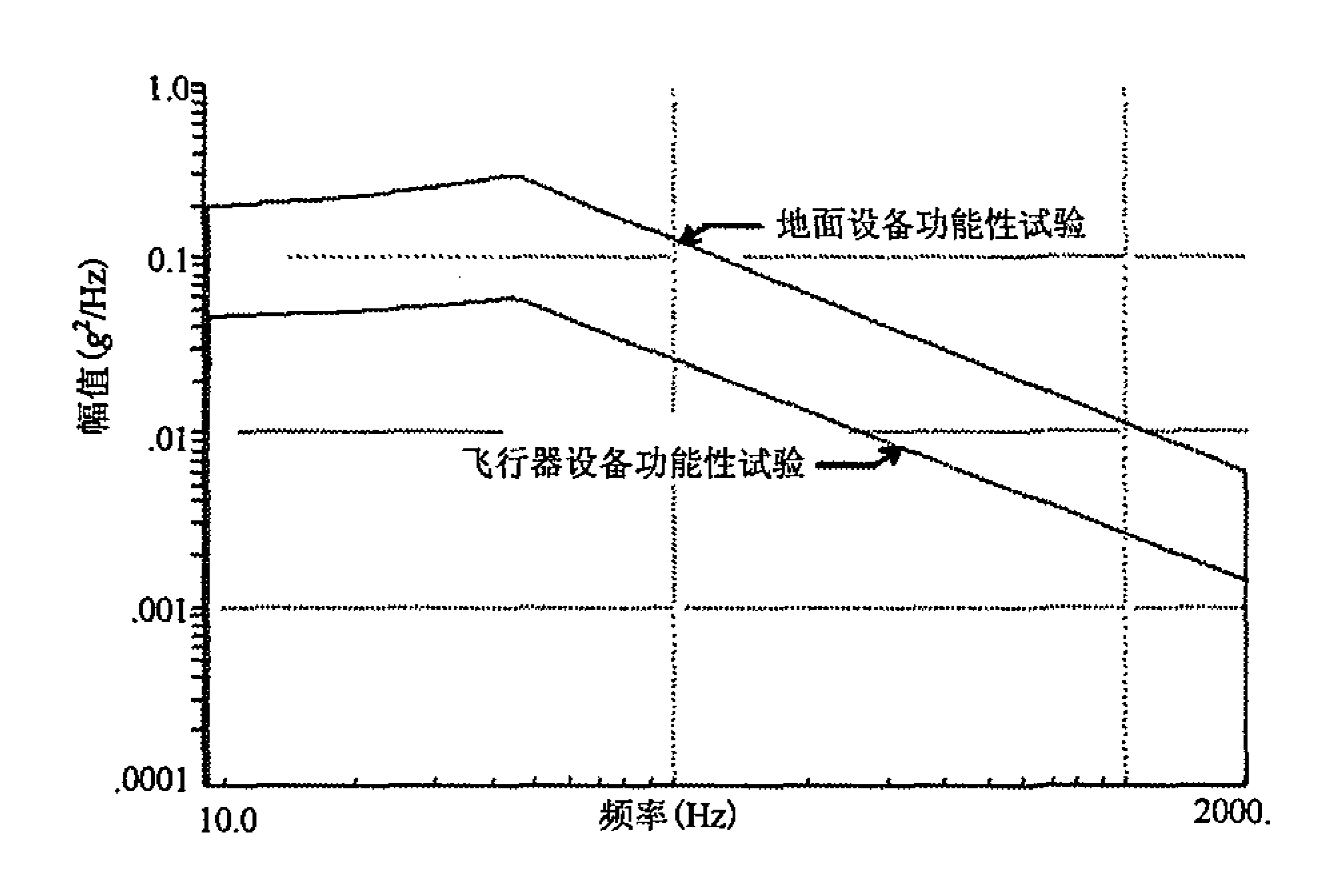


图 2　与图 1 等效的随机试验的输入 ASD

4.3.3.4 经典冲击脉冲

如果程序要求采用经典冲击脉冲，并且实测的数据在经典冲击脉冲的允差之内，则可采用经典冲击脉冲，否则，不予采用。

对程序 I——功能冲击和程序 V——坠撞安全，可选用后峰锯齿脉冲，后峰锯齿脉冲的波形和允差如图 3 所示，波形图应显示大约 $3T_D$ 时间长度的时间历程，脉冲大致位于中心。锯齿脉冲的峰值加速度是 P，持续时间为 T_D。测量的加速度脉冲应在虚线界线以内，测量的速度变化量(可通过加速度脉冲积分得到)应处在 $V_i \pm 0.1V_i$ 的范围之内，其中 V_i 是理想脉冲的速度变化量，等于 $0.5T_DP$。确定速度变化量的积分区间应从脉冲前的 $0.4T_D$ 延伸到脉冲后的 $0.1T_D$。

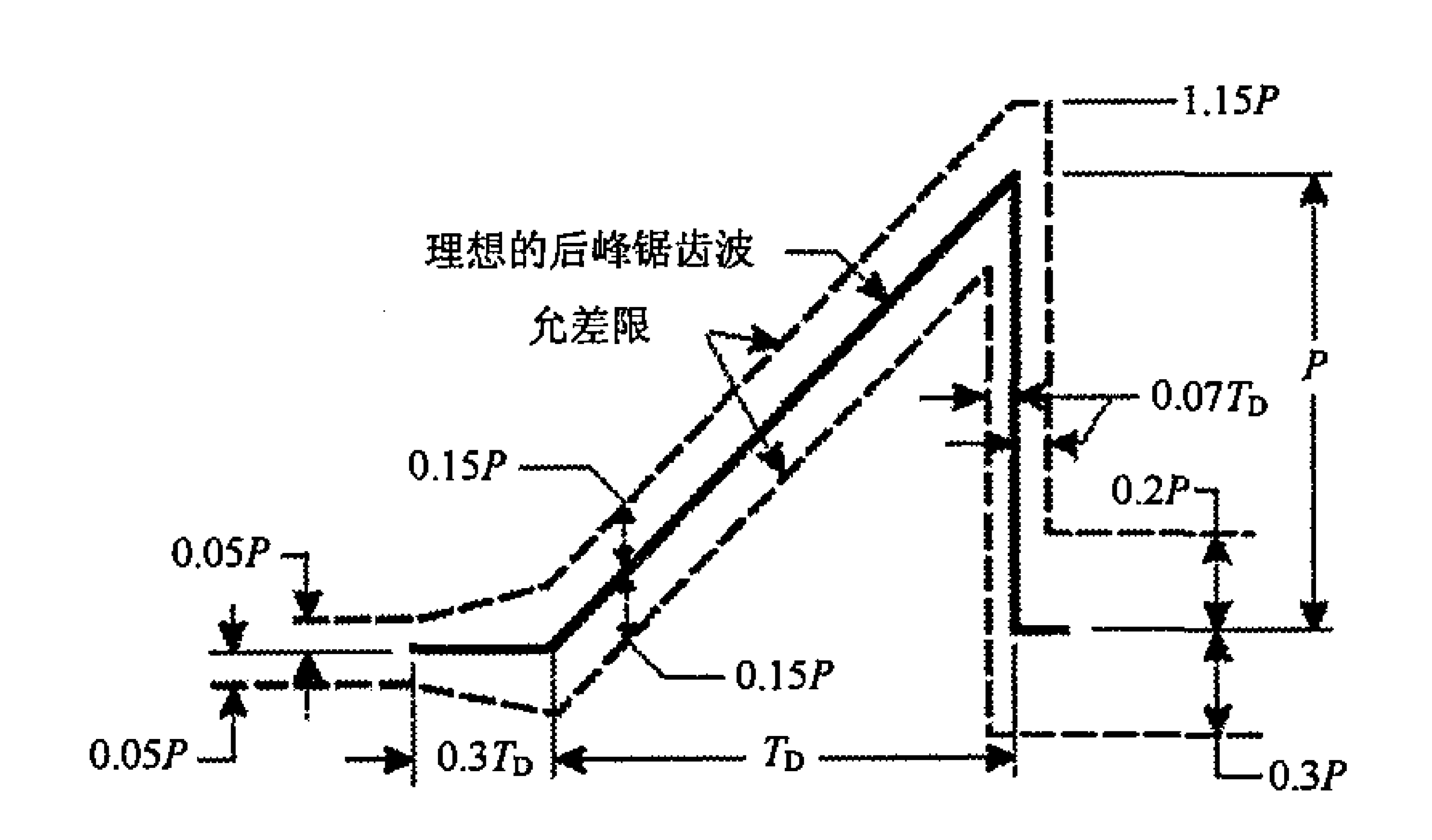


图 3 后峰锯齿波形参数和允差

对程序 II——需包装的装备或程序 III——易损性试验，可选用对称梯形脉冲，对称梯形脉冲的波形和允差如图 4 所示，波形图应显示包含了大约 $3T_D$ 时间长度的时间历程，脉冲大致位于中心。梯形脉冲的峰值加速度为 A_m，它的持续时间为 T_D，测量的加速度脉冲应在虚线界线以内，测量的速度变化量(可通过加速度脉冲积分得到)应处在 $V_i \pm 0.1V_i$ 的范围之内，其中 V_i 是理想脉冲的速度变化量，近似等于 $0.5A_{mg}(2T_D - T_R - T_F)$。确定速度变化量的积分区间应从脉冲前的 $0.4T_D$ 延伸到脉冲后的 $0.1T_D$，上升沿时间(T_R)和下降沿时间(T_F)应小于或等于 $0.1T_D$。

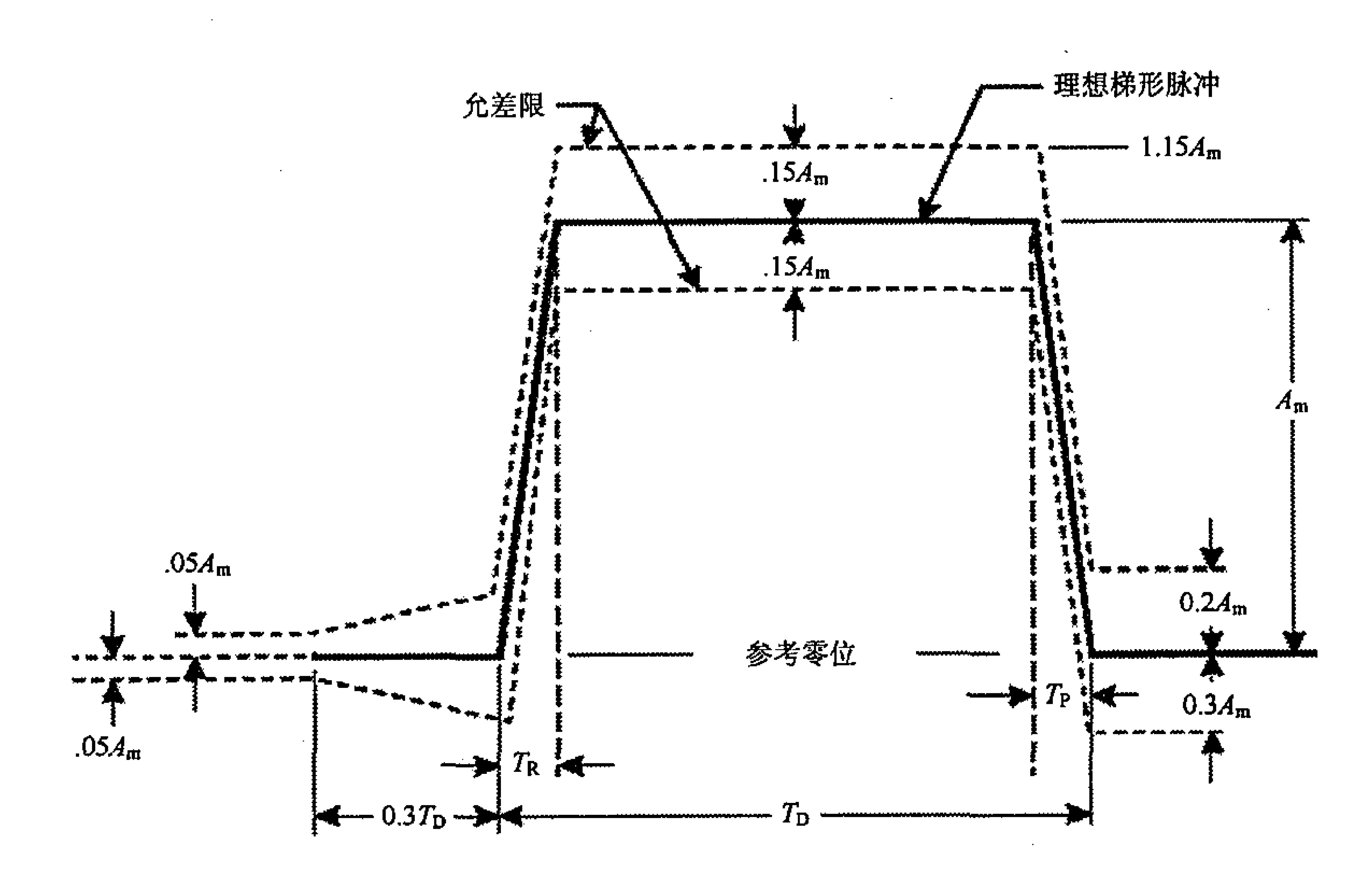


图 4 对称梯形脉冲波形参数和允差

4.3.4 试验轴向和冲击次数

4.3.4.1 一般要求

受试装备应承受足够次数的冲击。为满足规定的试验条件，三个正交轴的每一轴的两个方向上至少各进行三次冲击。对每个试验轴的每个方向上的经典冲击脉冲或复杂瞬态冲击脉冲，其在规定频率范围内的冲击响应谱应在要求的试验谱允差之内，并且其有效持续时间在 20%的允差之内。计算最大绝对加速度谱(或是等效静态加速度谱)时 Q 一般取 10，频率间隔应小于或等于 1/12 倍频程。如果要求的试验谱在一个轴的两个方向上同时满足，则重复三次冲击可满足该轴的要求。如果仅一个方向能满足试验要求，可在改变冲击时间历程的极性或者调换装备的方向后，对装备再施加三次冲击，以满足另一个方向的试验要求。(对于复杂瞬态脉冲，变换试验冲击时间历程的极性通常不会明显影响试验量级)。下述考虑适用于经典冲击脉冲和复杂瞬态脉冲：

a) 对可能很少承受冲击的装备，对每种环境条件可进行一次冲击；每个轴向最少做一次；如果考虑极性，每个轴向可进行两次冲击。对于速度变化量较大的冲击，对每种冲击环境只进行一次。

b) 对于可能经常承受某一冲击、但不能确定此冲击的次数的装备，应根据装备预期的使用情况，在每种冲击环境条件下进行三次或更多次的冲击；每个轴向最少进行三次冲击；如果考虑极性，每个轴向应至少进行六次冲击。

c) 如果装备没有明显的低频模态响应，允许冲击响应谱的低频部分超出允差限，以满足冲击响应谱对高频部分的要求。高频部分至少应从低于装备的第一阶固有频率的一个倍频程处开始。持续时间应保持在允差内。

d) 如果装备有明显的低频模态响应，为了满足冲击响应谱对低频部分的要求，如果复杂瞬态脉冲持续时间不超过 $T_e+\frac{1}{2f_{min}}$，复杂瞬态脉冲的持续时间可超出允差范围。如果持续时间必定超出 $T_e+\frac{1}{2f_{min}}$，就应采用其他冲击程序。

4.3.4.2 对复杂瞬态冲击的特殊处理办法

满足给定冲击响应谱的合成复杂瞬态冲击波形不唯一。由冲击响应谱合成的复杂瞬态冲击脉冲，如果超过了冲击施加系统的能力(通常在位移或速度上)，或持续时间比给定的 T_e 长 20%以上，应折衷考虑谱形和持续时间的允差。处理方法如下：

a) 如果装备没有明显的低频模态响应，为了满足冲击响应谱对高频部分的要求，允许冲击响应谱的低频部分超出允差限，高频部分规定为至少应从低于装备的第一阶固有频率的一个倍频程处开始。持续时间应保持在允差内。

b) 如果装备有明显的低频模态响应，为了满足冲击响应谱对低频部分的要求，如果复杂瞬态脉冲持续时间不超过 $T_e+\frac{1}{2f_{min}}$，允许复杂瞬态脉冲的持续时间超出允差限。如果为保持 SRS 的低频部分在允差内，而持续时间超过 $T_e+\frac{1}{2f_{min}}$，则应采用其他冲击程序。

不能采用将一个冲击响应谱分解成低频(大速度和位移)和高频两部分的办法来满足冲击要求。为实现最佳方案满足试验要求，可合理地设置复杂瞬态脉冲合成算法的输入参数。

4.4 试件的技术状态

试件的技术状态会严重影响试验结果。采用在装备的寿命期剖面中预期的技术状态，至少应考虑以下技术状态：

a) 在集装箱/储存容器或运输箱中；

b) 在工作环境中。

5 信息要求

5.1 试验前需要的信息

一般信息见 GJB 150.1A—2009 中的 3.8，特殊信息如下：

a) 试验夹具模态测量的有关信息。

b) 试件/夹具模态测量有关信息。

c) 下列冲击环境之一：

1) 预估的冲击响应谱或复杂冲击脉冲的合成波(衰减正弦、调幅正弦或其他波形等叠加)，具有规定的谱形、峰值、转折点和脉冲持续时间；

2) 选用的测量数据连同冲击响应谱合成技术(如果采用冲击响应谱合成技术，应确保谱形和冲击的持续时间与规定值相同)；

3) 在直接波形控制下，一个已补偿的波形输入到振动/冲击系统中的测量数据。

d) 用于处理输入和输出响应数据的技术。

5.2 试验中需要的信息

5.2.1 一般信息

见 GJB 150.1A—2009 中的 3.11。

5.2.2 特殊信息

包括与装备在加速度作用下失效判据有关的信息。特别注意从传感器接收信号的测试仪器，对速度高的冲击试验，应避免电缆的甩动而给测量仪器带来噪声。

5.3 试验后需要的信息

一般信息见 GJB 150.1A—2009 中的 3.14，特殊信息如下：

a) 每次冲击的持续时间和冲击的次数。

b) 每次外观检查后试件的状态。

c) 响应时间历程和对响应时间历程处理后的信息。一般情况下，最大绝对加速度的冲击响应谱和伪速度冲击响应谱应作为单自由度系统的无阻尼固有频率的函数而提供。有时，需提供能量谱密度和傅立叶谱。

d) 试件/夹具的模态分析数据。

6 试验要求

6.1 试验设备

所用的冲击试验设备应能产生本试验的有关文件所确定的试验条件。冲击试验设备可以是自由跌落、弹性回弹、非弹性回弹、液压、压缩气体、电动振动台、电液振动台、有轨车辆和其他激励装置。选择试验设备时应考虑试验设备能产生试件所要求的冲击持续时间、幅值和频率范围。如电动振动台能产生冲击的频率范围是 5Hz～3000Hz，而电液振动台的可控频率范围是 DC～500Hz。程序 II 和程序 III 需要有相对较大位移的冲击试验设备。程序 VII 采用了铁路车厢的特殊试验装置，它能同时提供甚低频和中高频的响应。程序 VIII 通过采用两个冲击脉冲和一个位于这两个冲击脉冲之间的瞬态振动来满足弹射起飞的要求。

6.2 试验控制

6.2.1 校准

按所选择的试验程序中规定的试验要求，对试验装置性能进行校准。测量装备响应的设备应校准。为达到试验规范的要求，一般采用一个“模拟负载”。“模拟负载”的质量和刚度应与装备相似，即“模拟负载”应尽可能地复现装备的模态特性，特别是与夹具/试验设备的模态相互耦合的那些特性。校准时，对“模拟负载”连续进行两次冲击，要求满足程序 I、程序 II、程序 III、程序 V 或程序 VI 所述的试验条件(程序 IV 不需进行校准，程序 VII 有一套特别的校准程序)。如果“模拟负载”上的响应数据

满足试验允差要求，可卸去“模拟负载”，装上装备进行冲击试验。建议所有试验都使用“模拟负载”进行校准。

6.2.2 允差

6.2.2.1 概述

为保证试验的有效性，应满足各程序规定的允差以及下述指南的要求。如果无法满足这个允差，则对允差的要求需在试验前经有关部门同意后方可放宽。根据下面的指南独立地制定的允差，应在所规定的测量校准、仪器、信号调节和数据分析方法的限制范围之内。

6.2.2.2 冲击脉冲的时域允差

时域允差规定对复现冲击测量数据和使用电动振动台、电液振动台进行易损性试验是有用的。经典后峰锯齿波和梯形波脉冲的峰值和持续时间允差分别如图 3 和图 4 所示。复杂瞬态脉冲的允差要求制定是基于下述假设：要求测量数据的峰谷顺序按所规定时间历程的峰谷顺序排列。复杂瞬态冲击脉冲的主要峰值和谷值定义为超过其最大峰(谷)值 75%的峰(谷)值，其 90%的主要峰值和谷值的允差应分别在所要求峰(谷)值的±10%内，此允差限假定冲击试验设备能够用波形控制程序精确地复现所要求的冲击波形。

6.2.2.3 响应谱的允差

对于图 1 规定的最大冲击响应谱得到的瞬态冲击脉冲和其他测量数据得到的复杂瞬态冲击脉冲，允差一般根据给定频带上的幅值和持续时间的允差给定。如果以前的实测数据是适用的或者进行了一系列的冲击测量，在 10Hz～2000Hz 的频带内至少 90%的频带，以 1/12 倍频程的频率分辨率计算的最大加速度响应谱允差应在－1.5dB 至 3dB 范围内，对余下的 10%频带，允差应在－3dB 与 6dB 内。复杂瞬态脉冲的持续时间允差应在测量脉冲有效持续时间 T_e 的±20%之内。

伪速度冲击响应谱规定的允差应从最大加速度响应谱的允差导出，并与最大加速度响应谱的允差和有效持续时间允差相一致；对于按“区域”定义的一组测量数据，幅值允差可按“区域”内测量数据的平均值规定。但应注意，这实际上放松了单个测量数据的允差，即个别测量值实际上可能超出了允差，但平均值在允差内。一般，在一个区域内，当用两个以上测量数据的平均值规定允差时，允差带不应超过由其对数变换的冲击响应谱估计的 95/50 单边正态容差上限，或不能比平均值低 1.5dB。使用任何“区域”允差和平均技术时，应有相关技术文件支持。脉冲持续时间的允差也适用于测量数据组的脉冲持续时间。

6.3 试验中断

6.3.1 一般要求

见 GJB 150.1A－2009 中的 3.12。

6.3.2 特殊要求

一般情况下，冲击试验程序的中断不会产生任何有害的影响，可从中断点继续试验。

6.4 测试仪器

6.4.1 概述

通常采用加速度计进行定量测量，有时可使用其他类型传感器，例如，线性位移/电压传感器、力传感器、激光测速仪、速率陀螺等。这些设备的性能应满足校准、测量和分析的技术要求。所有测量仪器应计量检定合格并在有效期内。此外，测量装备功能的仪器也应检定。

6.4.2 加速度计

要求如下：

a) 横向灵敏度小于或等于 5%；

b) 在试验要求的峰值加速度的 5%～100%内，幅值线性度在 10%以内；

c) 对程序 I、程序 II、程序 III、程序 IV、程序 V、程序 VI 和程序 VIII，在 2Hz～2000Hz 频率范围内，频率响应的平直度在±10%以内；

d) 当响应低于 2Hz 时，应采用压阻加速度计，在规定的测量频带内，频率响应的平直度应在±10%以内；

e) 测量传感器及其安装应与相关的技术要求一致。

6.4.3 其他测量仪器

用于数据采集的所有其他测量仪器应满足试验的要求，尤其要满足 6.2 规定的调校和允差要求。

6.4.4 信号适调器

使用的信号适调器应满足有关试验程序对仪器的技术要求，特别是对模拟电压信号的滤波应满足时间响应历程的要求（通常在响应频带内应具有线性相位），滤波的配置不会将由于削波造成的异常加速度数据错误地当作响应数据。对放大器输出端加速度信号滤波应特别小心。为防止滤掉畸变的数据而造成无法检测到这些畸变的数据，不要对进入放大器的信号进行滤波。信号调节后的信号在进行数字化之前应进行抗混滤波。

6.5 数据分析

应考虑以下问题：

a) 在分析频带内模拟式抗混滤波器性能应满足：
   1) 混叠测量误差不超过 5%；
   2) 具有线性相移特性；
   3) 幅值平直度应在±1dB 内。

b) 在后续数据处理中，使用的数字滤波器性能应与模拟抗混滤波器相当，特别是用于冲击时间历程处理的数字滤波器应具有线性相位特性。

c) 分析过程应按相关的技术要求进行，特别是要验证冲击加速度的幅值时间历程。在处理响应时间历程之前，对每个幅值时间历程进行积分以检查测量系统的异常现象，如导线断裂、放大器压摆率超限、数据削波、无法解释的加速度计零漂等。如果发现异常现象，应剔除无效的响应时间历程测量数据。

7 试验过程

7.1 试验准备

7.1.1 试验前准备

试验开始前，根据有关文件确定试验程序、模拟负载、试件的技术状态、测量仪器的技术状态、冲击量级、持续时间、冲击次数等。

7.1.2 初始检测

试验前所有试件均需在标准大气条件下进行检测，以取得基准数据。检测按以下步骤进行：

a) 对试件进行全面的外观检查，特别注意关键部位或易损伤的区域，并记录结果；

b) 试件合格，将试件安装到夹具上；

c) 按技术文件的规定，进行试件的运行检测，记录检测结果；

d) 若试件工作正常，则继续后续的试验程序；若试件工作不正常，则设法解决问题，再从 a) 开始。

7.1.3 试验程序概述

涉及冲击试验信息的收集要求见 7.2。除了 GJB 150.1A－2009 的 3.17 提供的一般指南外，每一试验程序中还包含对试验结果评估有用的信息，用于故障分析。分析试件所有未能满足系统规范要求的情况。

7.2 试验程序

7.2.1 程序 I——功能性冲击

7.2.1.1 概述

本试验程序的目的是发现在外场使用中可能由冲击引起的装备故障。虽然装备已在包装/运输冲击

试验中成功地经受住相当严酷的冲击，但由于存在着支撑和固定方法的差别，以及功能性检查要求方面的差异，还有必要进行这项试验。当有可用数据、数据可测量或数据可用的动力学类比技术根据相关数据进行估计时，要求对试验进行剪裁。当没有用于剪裁的外场测量数据时，冲击试验的输入冲击响应谱由图 1 和表 1 的信息确定。用电动振动台或电液振动台进行冲击试验时，校准程序应将上述冲击响应谱经补偿后的复杂波形作用于模拟负载。在剪裁中，如果不能证明外场冲击环境近似于经典冲击脉冲(如半正弦、后峰锯齿等)，一般不可使用经典冲击脉冲；但若无其他方法可用，则可用图 3 的后峰锯齿波进行试验。为确保正负两个方向都满足图 1 对谱的要求，试验应在正、负两个方向上进行。图 2 给出了与图 1 冲击试验响应谱等效的随机振动的加速度谱密度。如果试件在冲击试验前已经作过随机振动，随机振动的加速度谱密度达到或超过了图 2 的加速度谱密度量级，并且随机振动试验中的功能试验要求和冲击试验的相同，则经许可后可不进行功能性冲击试验。

7.2.1.2 控制

当没有测量数据，且试件为飞行器设备或地面设备时，图 1 给出了预计的功能性冲击试验的输入冲击响应谱，持续时间 T_e 由表 1 给出。图 2 提供了与图 1 冲击试验响应谱等效的随机振动的加速度谱密度。如果试件在冲击试验前已经作过随机振动，先前的随机振动的加速度谱密度达到或超过了图 2 的加速度谱密度量级，并且随机振动试验中的功能试验要求又与冲击试验的相同，则经批准后可不进行功能性冲击试验。

表 2 后峰锯齿脉冲试验参数(见图 3)

试验	最小峰值 P g		标称持续时间 T_D ms	
	飞行器设备 [a]	地面设备	飞行器设备 [a]	地面设备
功能性试验	20	40[b]	11	11

[a] 推荐用于无防冲击的装备和重量低于 136kg 的装备。
[b] 对安装在卡车和拖车上的装备，用 20g 峰值。

7.2.1.3 试验允差

对具有复杂瞬态波形的测量数据，应确保试验允差符合 6.2.2 有关的要求。当用随机试验的加速度谱密度进行等效冲击响应谱试验时，图 2 的加速度谱密度允差下限在整个频带内为−1dB，而允差带的上限没有规定(一般情况下，采用等效试验是因为振动的环境通常比图 2 中规定的加速度谱密度更严酷)。附录 D 给出了 $Q=5$ 时，图 2 中的随机加速度谱密度所对应的最大冲击响应谱的经验分布信息。

对于经典的后峰锯齿波脉冲试验，表 2 规定的试验参数允差要求如图 3 所示。

7.2.1.4 试验步骤

程序 I 的步骤如下：

a) 选择试验条件，并按如下要求校准冲击试验设备：
   1) 选择满足或优于相关技术要求的加速度计和分析技术。
   2) 按类似于试件技术状态将模拟负载安装在冲击试验设备上。若装备安装在振动/冲击隔振器上，应确保试验期间隔振器起作用。若冲击试验设备输入波形是在波形控制中通过输入输出脉冲响应函数进行补偿得到，要特别注意校准的状态和后续的数据处理细节。
   3) 进行冲击校准，直到作用在模拟负载上的连续二次冲击所产生的波形至少在一个轴向上达到或超过规定的试验条件并符合 7.2.1.3 规定的试验允差要求。
   4) 卸去模拟负载，把试件安装到冲击设备上。
b) 对试件进行冲击前的功能检查。
c) 在工作状态下，对试件施加冲击激励。
d) 记录必要的数据以检查试验是否达到或超过要求的试验条件，并符合 7.2.1.3 规定的允差要求。这些数据包括试验装置照片、试验记录、从数据采集系统得到的实际冲击波形照片等。对内装

有隔振部件的试件，应对隔振部件作测量/检查，以确保这些部件不和相邻的部件发生碰撞。若需要，记录的数据能够说明在冲击期间装备的功能满足要求。

e) 对试件进行冲击后的功能检查，记录性能数据。

f) 若采用规范规定的冲击响应谱，在每一正交轴上重复 b)～e) 三次。如果采用经典冲击脉冲，试件应承受正反两个方向的输入脉冲。若冲击响应谱的波形既满足脉冲时间历程允差，又满足冲击响应谱允差，考虑极性的影响，每一正交轴上应进行 2 次，总共 6 次冲击试验。如果试验脉冲的时间历程和冲击响应谱中有一种超差或都超差，则需继续调整波形，直到两者的试验都满足允差为止。若两种允差不能同时满足，则应优先满足冲击响应谱试验允差。

g) 记录试验次序。

7.2.1.5 结果分析

按 GJB 150.1A—2009 中 3.17 进行试验结果评估。关注在冲击期间或之后的任何装备功能中断，这与装备功能试验要求密切相关。这些信息也有助于评估试验结果。

7.2.2 程序 II——需包装的装备

7.2.2.1 概述

本试验目的是确保有包装的装备在包装前、包装期间或包装后不慎跌落后其功能正常。通常，这种输入会使装备产生较大的速度/速度变化量。如果速度/速度变化量超过常规电动振动台或电液振动台的能力，可在校准过的跌落式冲击试验机上用经典梯形脉冲实现。但如果电动振动台、电液振动台能满足这个大速度和大速度变化量要求，应考虑在电动振动台、电液振动台上用复杂瞬态波形来进行试验。与有响应时间历程不同，如果没有有效的测量数据，可在电动振动台或电液振动台上使用经典梯形脉冲。如果有可用的数据、数据可测量或可以从相关数据估计得到，应采用动力学类比技术来剪裁试验参数。

7.2.2.2 控制

采用经典梯形脉冲时，使处于非工作状态的未包装的试件承受一系列 $A_m=30g$ 梯形冲击脉冲，其持续时间（单位：s）由表 3 和式(2)确定（假设完全弹性回弹）。

$$T_D=\frac{2\sqrt{2gh}}{A_m} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中：

h ——设计跌落高度，cm；

A_m ——冲击加速度峰值，g；

T_D ——冲击持续时间，s；

g ——重力加速度，980.6cm/s^2。

表 3 梯形脉冲参数（见图 4）

试验	峰值 A_m g	标称持续时间 T_D s
包装冲击	30	$2\sqrt{2gh}/Am$

由于实际的位移和速度较大，更多选用波形可调的冲击设备或长冲程的电液振动台，选择梯形脉冲的原因是：

a) 它产生的速度变化量比设计跌落高度更容易计算，比大多数的冲击响应谱合成程序更易复现；

b) 在给定的峰值加速度输入量级下，梯形脉冲给出了初始冲击响应谱和最大冲击响应谱的上限（其中初始冲击响应谱定义为在脉冲持续时间内的冲击响应谱）。

对采用复杂波形进行冲击响应谱冲击控制的剪裁试验，应确保试验输入在规定的允差内。

7.2.2.3 试验允差

对复杂瞬态冲击波形的测量数据，试验允差应符合 6.2.2 的要求；对经典梯形脉冲试验，应满足图 4 所示的试验允差要求。

7.2.2.4 试验步骤

程序II的步骤如下：

a) 按如下方法调校冲击设备：
   1) 将模拟负载按类似真实试件的安装方式安装在冲击试验设备上。夹具的形状和结构应类似于将试件支撑在运输容器内的冲击减震系统，夹具应尽可能刚硬，以防止传递给试件的冲击脉冲畸变，若冲击试验设备输入波形是经输入输出脉冲响应函数补偿后的波形，要特别注意校准状态和后续的数据处理细节。
   2) 进行冲击校准，直到作用在模拟负载上的连续二次冲击所产生的波形都在规定的试验允差内。
b) 卸去模拟负载，把试件安装在冲击设备上。
c) 对试件进行冲击前的功能检查。
d) 对试件施加冲击激励。
e) 记录必要的试验资料，包括试验装置照片、试验记录、由数据采集系统得到的实际冲击波形图片等。
f) 对试件进行冲击后的功能检查。
g) 对经典梯形冲击脉冲，在三个正交轴的每一轴的正和负方向上，重复c)～f)一次(共六次冲击)。对复杂瞬态冲击，在三个正交轴的每一轴上重复c)～f)一次(共三次冲击)。
h) 记录试验结果，包括测量的试验响应波形图和冲击试验前、后试件的功能异常。

7.2.2.5 结果分析

按GJB 150.1A－2009中3.17进行试验结果评估。评估中要关注冲击夹具或试件的内部结构的损伤，这些可用于失效原因分析，以考虑重新安装或重新设计。这些信息也有助于评估试验结果。

7.2.3 程序III——易损性

7.2.3.1 概述

本试验的目的是确定装备能承受住的最高冲击量级(在此量级下，装备仍能够按要求继续工作而结构没有损伤)；或者损坏装备的最低输入冲击量级(若经受稍高于该量级的冲击输入，则装备将很可能出现功能故障或结构损伤)。确定易损性的量级应通过对试件从低的冲击量级开始，然后逐渐增加冲击量级进行试验直到以下条件之一出现为止：

a) 试件出现失效；
b) 在试件不发生失效情况下，达到预定的试验目的；
c) 达到冲击临界量级，表明在稍高于此冲击量级作用下肯定发生失效。

最后一点c)意味着在试验前已对装备进行了分析；确定了关键部件及其“应力阈值”；并建立了与冲击输入量级有关的装备失效模型。此外，在试验期间，这些关键部件的“应力阈值”可被监测，并输入到失效模型中，用于预测在所给定冲击量级下的失效情况。通常，这种输入会使装备产生较大的速度/速度变化量，如果大的速度/速度变化量超过电动振动台、电液振动台的能力，可在经校准的跌落式冲击机上用经典梯形波实现。但如果电动振动台、电液振动台能满足大的速度/速度变化量的要求，应考虑用复杂瞬态波形来剪裁试验。如没有提供可剪裁为复杂瞬态波形的冲击输入数据，可考虑在电动振动台、电液振动台上使用经典梯形脉冲。在试验中，应注意：在保持冲击试验最大速度变化量近似不变的情况下，只有一个单一的参数(冲击输入的峰值)来定义易损性量级。在冲击响应谱合成波形试验中，最大速度变化量不像在经典梯形脉冲中那样有明确的定义，也不重要、也不容易控制。当有数据可用、数据可测量或可用动力学类比技术从相关数据估计时，要对试验进行剪裁。易损性试验的一个重要假设是损伤势能随冲击量级增加而线性增加，否则，需采用其他试验程序来确定装备的易损性量级。

7.2.3.2 控制

试验程序的控制应考虑下列几点：

a) 根据装备运输环境的测量结果，选择设计跌落高度 h。当无测量数据时，由表 4 选取设计的跌落高度(设计跌落高度是装备在运输过程中可能发生跌落并且仍能继续使用的高度)，最大速度变化量可从表 4 取得或由式(3)确定：

$$\Delta V = 2\sqrt{2gh} \quad \cdots\cdots (3)$$

式中：

ΔV ——最大速度变化量，cm/s(碰撞速度和回弹速度的和)；

h ——设计跌落高度，cm；

g ——重力加速度，980.6cm/s^2。

试件的最大速度变化量是假设完全回弹，除气动弹簧外的其他材料并不是 100%的完全回弹，因此最大试验速度会适当降低。对与气动弹簧不同的材料的跌落式冲击机，若用规定的最大速度进行试验则试验是保守的(过试验)，最大试件速度是一个回弹要求。

b) 将冲击试验设备调到比预期的易损性量级稍低的最大加速度量级 A_m(见表 5)。通过设计跌落高度 h 和 7.2.2.2 中 T_D 的表达式确定适当的脉冲持续时间。若没有 A_m 的初始值则可采用 15g。若没有出现损伤，保持试件最大速度变化量不变的条件下逐渐增大 A_m(即减少脉冲持续时间)，直至试件出现损伤。由此得到装备的临界冲击加速度易损性量级。

c) 用于本程序的试验量值是一个较好的推荐值。若有更适用的试验数据则应予以采用。特别是，若收集到装备跌落数据和计算的环境冲击响应谱数据，假如未超过电动振动台和电液振动台的位移和速度限制，且试件的最大速度变化量可以近似保持不变，则可采用的冲击响应谱类比法建立在电动振动台和电液振动台上所测环境的加速度易损性量级。除最大加速度响应谱外，还应计算伪速度响应谱。

表 4　程序 II 推荐的跌落高度

包装毛重 kg	类型	设计跌落高度 cm	最大试件速度变化量 cm/s
0～9.1	人工装卸	76	772
9.2～18.2	人工装卸	66	719
18.3～27.2	人工装卸	61	691
27.4～36.3	人工装卸	46	600
36.4～45.4	人工装卸	38	546
45.5～68.1	机械装卸	31	488
68.2～113.5	机械装卸	26	447
≥113.6	机械装卸	20	399

表 5　梯形脉冲试验参数(见图 4)

试验	峰值 A_m g	标称持续时间 T_D s
易损性	10～50	$2\sqrt{2gh}/A_m$

7.2.3.3　试验允差

假设测量时仪器噪声很低，试验允差的要求可得到满足。对来自测量数据的复杂瞬态波形的允差应符合 6.2.2 的要求；对经典脉冲波形试验，应确保表 5 中规定的参数满足图 4 规定的试验允差。

7.2.3.4　试验步骤

7.2.3.4.1　概述

本试验程序用来确定严酷度，直到试件发生失效或达到预定目的为止。只要在试验前没有确定易损

轴方向，就可能有必要在每个冲击试验后变换试验轴向。通常在改变到下一量级前，所有重要轴向都应在相同的量级下试验过。在技术文件中应清楚地说明每次试验的试验次序和调校要求，并根据装备状况或试验环境要求，最好预先确定严酷度量级试验步骤，并将其写入技术文件中。应该注意到：如果不能用分析预示临界的应力阈值，并且没有跟踪测试应力阈值的仪器，就没有合理的方法估计下一冲击输入量级超过应力阈值的可能性。下面的程序适用于在单个轴向上进行试验，一种用于经典脉冲，另一种用于复杂波形，如果需要在更多的轴向上进行试验，程序应作相应修改。

7.2.3.4.2 经典脉冲

本程序采用经典脉冲方法来确定易损性量级，通过增加试件跌落高度从而直接增加 ΔV 来实现。易损性量级以测量变量——经典脉冲的峰值加速度给出。程序步骤如下：

a) 将模拟负载按类似于真实试件的安装方式安装到试验设备上，夹具的结构类似于支撑装备的冲击减震系统(如果有)，夹具应尽可能刚硬以防止传递给试件的冲击脉冲畸变。
b) 进行调校冲击，直到加到模拟负载上的连续二次的冲击波形都在试验规定的允差限内。若冲击校准的响应相对冲击输入量级而言是非线性的，则依据达到“应力阈值”之前的非线性程度，确定是否采用其他试验程序确定易损性。
c) 选取一个足够低的跌落高度，以确保试件不发生损伤。对于那些未列在表 4 中的跌落高度，最大速度变化量可由式(3)计算。
d) 将试件安装到夹具上。对试件进行外观和功能检查，记录试验前的状态。
e) 在选定的量级上进行冲击试验，检查记录的数据以确保试验在允差范围内。
f) 对装备进行外观和功能检查，以确定试件是否损伤。若发现损伤或达到预定的试验目的，转到 j)。
g) 如果需要在多个轴向上确定试件的易损性，在改变跌落高度前，在其他轴向上继续进行试验。
h) 若试件完好，则选取下一跌落高度。
i) 重复 e)～h)，直到到达试验目的。
j) 记录结果，用与跌落高度相关联的测量变量来表示易损性量级。若试验期间试件在某一轴向上发生损坏，则用另一个相同技术状态的试件来替代损坏的试件，从 d)开始进行试验，以确定其余轴向上的易损量级。

7.2.3.4.3 合成脉冲

本程序假定易损性量级是加速度峰值的函数，该加速度峰值由一个复杂瞬态过程的最大加速度冲击响应谱表示。对于在时域上定义的复杂瞬态脉冲，本程序可使用时间历程的加速度峰值来表示易损性量级。程序步骤如下：

a) 将模拟负载按类似于真实试件的安装方式安装到试验设备上，夹具的结构类似于支撑装备的冲击衰减系统(如果有)，夹具应尽可能刚硬以防止传递给试件的冲击脉冲畸变。
b) 进行调校冲击，直到加到模拟负载上的连续二次的最大加速度冲击响应谱都在规定的允差限内。若冲击调校的响应相对冲击输入量级而言是非线性，则依据在达到“应力阈值”之前的非线性程度，确定是否需要采用其他试验程序确定易损性。
c) 选取一个足够低的最大加速度冲击响应谱，以确保试件不发生损伤。
d) 将试件安装到夹具上。对试件进行外观和功能检查，记录试验前的状态。
e) 在选取的量级上进行冲击试验，检查记录的数据以确保试验的最大加速度冲击响应谱在允差范围内。
f) 对装备进行外观和功能检查，以确定试件是否损伤。若发现损伤或达到预定的试验目的，则转到 j)。
g) 如果要求在多个轴向上确定试件的易损性，在改变最大加速度冲击响应谱量级之前，在其他轴向上继续进行试验。

h) 若试件完好，选取下一预定的最大加速度冲击响应谱的量级。

i) 重复 e)～h)，直到达到试验目的为止。

j) 记录结果，用最大加速度冲击响应谱来表示易损性量级。若试验期间试件在某一轴向上发生损坏，则用另一个相同技术状态的试件来替代损坏的试件，并从 d)开始继续试验，以确定其余轴向的易损性量级。

7.2.3.5 结果分析

按 GJB 150.1A－2009 中 3.17 进行试验结果评估。成功的易损性试验结果提供的是在每一个试验轴向上测量的试件失效量级。如果试件在最低的试验量级下发生功能或结构失效，并且不准备在更低试验量级下试验，则试件的易损性无法确定。

7.2.4 程序Ⅳ——运输跌落

7.2.4.1 概述

试验的目的是确定装在运输箱或组装箱内的装备，在运输跌落状态下的结构和功能的完好性。用快速释放的吊钩或跌落试验机进行各项试验。一般情况下，试验中不需进行仪器校准，同时所需测量的信息也最少，但如果需要测量，除测量幅值的时间历程外，还可给出相应的最大加速度冲击响应谱和伪速度冲击响应谱。

7.2.4.2 控制

本试验的试验量级列于表 6 中。按真实的运输、搬运或作战环境下的相同状态对试件进行试验，对于小于 45kg 的试件，取不多于 5 个的相同试件以任意组合方式分配 26 次跌落(见表 6)。在外场，试件碰撞后会发生倾倒，因此，在经受最初碰撞后，只要试件没有离开要求的跌落面，就不应限制试件发生的倾倒。本试验的量级是由外场中装备经常遇到的跌落方式来确定(例如，轻型装备可由一人提到胸高搬运，因此跌落高度可能为 122cm)。现场数据表明，一个典型的便携式装备在其寿命期内，从 122cm 以内的高度平均会跌落 4 次～6 次。这 26 次跌落要求是为了保证典型试件的每一个易损位置(面、边和角)都承受一次冲击。

7.2.4.3 试验允差

确保跌落的试验高度允差在表 6 规定的跌落高度的 2.5%之内。

表 6 运输跌落试验

<table>
<tr><th>试件和箱子重量
kg</th><th>最大尺寸
cm</th><th>跌落方式</th><th>跌落高度
cm</th><th>跌落次数</th></tr>
<tr><td rowspan="2">≤45.4，
人工包装或人工搬运</td><td><91</td><td rowspan="5">由快速脱钩或跌落试验机进行跌落试验。试件的取向应使撞击时撞击的角或棱边到箱子和其内装物的重心的连线垂直于撞击面。</td><td>122</td><td rowspan="2">对每个面、棱边和角跌落，总共跌落 26 次[a]</td></tr>
<tr><td>≥91</td><td>76</td></tr>
<tr><td rowspan="2">>45.4～90.8</td><td><91</td><td>76</td><td rowspan="5">对每个角跌落，总共跌落 8 次</td></tr>
<tr><td>≥91</td><td>61</td></tr>
<tr><td rowspan="3">>90.8～454</td><td><91</td><td>61</td></tr>
<tr><td>91～152</td><td rowspan="2">使装有试件的运输箱或组合箱的最长尺寸边平行于地面，其一端的一角用 13cm 高的垫块支承，而在同端的另一角或棱用 30cm 高的垫块支承。提起箱子的对端使最低的未支撑角达到规定的高度并让其自由下落。</td><td>61</td></tr>
<tr><td>>152</td><td>61</td></tr>
<tr><td>>454</td><td>不限</td><td>在正常运输状态下，箱子和箱内物应经受如下的棱边跌落试验(若不知正常运输状态，则箱子的放置应使两个最大尺寸边平行地面)：箱子底面一条棱边支承在 13cm～15cm 高的垫块上，提起对角棱边到规定的高度并让其自由下落。对箱子底面每一棱边进行一次试验(总共跌落 4 次)。</td><td>46</td><td>每个底棱边跌落，底面或垫木跌落；总共跌落 5 次</td></tr>
<tr><td colspan="5">[a] 如果可能，将 26 次跌落分配给不多于 5 个试件(见 7.2.4.2)。</td></tr>
</table>

7.2.4.4 试验步骤

程序Ⅳ的步骤如下：

a) 在进行外观检查和功能检查，获取基准数据后，将试件安装在为外场使用而准备的运输箱或组合箱内。如果要获取测量信息，则安装和校准测量仪器。
b) 按7.2.4.2和表6确定跌落高度、每一试件的跌落次数和跌落面。
c) 按7.2.4.1要求和表6用试验设备执行所要求的跌落。建议在跌落试验中，定期对试件作外观和功能检查，便于以后可能需要的失效评估。
d) 记录每次跌落的碰撞点或碰撞面，以及所有明显的损坏。
e) 在完成需要的跌落次数后，对试件作外观检查。
f) 记录试验结果。
g) 按技术文件的规定进行功能检查。
h) 记录结果，并与a)得到的数据作比较。若跌落期间已获得测量数据，则检查其时间历程，并根据技术文件规定的程序对其进行数据处理。

7.2.4.5 结果分析

按GJB 150.1A—2009中3.17进行试验结果评估。试验的结果分析通常应包括对试验前、后的外观和功能检查结果进行比较，测量仪器和后续的加速度时间历程处理结果能够提供与试件响应特性和冲击环境的统计有关的有用信息。

7.2.5 程序Ⅴ——坠撞安全

7.2.5.1 概述

本试验程序的目的是暴露在空中或地面运输工具上的装备或装备支架的结构故障。在运输工具发生碰撞过程中和碰撞后，如果装备从支架上松动脱离，可能对人员或其他装备构成危险。本试验程序旨在确认在坠撞情况下装备支架或约束装置不发生破坏，附属部件不弹出。试件是用实际使用中的支架或系紧装置将其安装在冲击夹具上。

7.2.5.2 控制

采用图1的冲击响应谱作为各试验轴向的试验谱，对于飞行器设备，有效冲击持续时间T_e取15ms～23ms，对地面设备取8ms～13ms。若不具备冲击谱分析能力，可使用图3所示的经典后峰锯齿脉冲代替由图1中的冲击响应谱计算得到的复杂瞬态波形。表7给出了后峰锯齿脉冲的参数。由于在飞机安全坠撞时，假设局部加速度值接近40g，基于这点，飞行器设备的坠撞量值取40g。地面运输工具采用更高安全系数设计，因此应能承受更高的加速度量值，所规定的试验量值也相应更高。

7.2.5.3 试验允差

对基于冲击响应谱的复杂波形的重现，要确保试验允差在6.2.2对冲击响应谱所规定的范围内。对于表7中所列的经典脉冲——后峰锯齿脉冲，要确保波形在图3中所规定的允差范围内。

7.2.5.4 试验步骤

程序Ⅴ的步骤如下：

a) 将试件按使用中的安装方式安装在冲击设备上。所用的试件可以是与装备动力学特性相似的试件，或是力学特性等效的模拟件。若使用模拟件，则表明它与被模拟装备具有相同的潜在危险、质量、质心和相对安装点的惯性矩。如果要获取测量信息，则要安装和校准测量仪器。
b) 沿试件的三个正交轴的每个方向(在4.3.4中规定的)进行2次冲击，最多总计12次冲击。
c) 对试验装置进行结构检查，不要求试件工作。
d) 记录结构检查结果，包括评估由于装备的损坏或结构变形或两者综合而引起的潜在危险。按最大加速度冲击响应谱或伪速度冲击响应谱要求处理测量数据。

7.2.5.5 结果分析

按 GJB 150.1A－2009 的 3.17 进行试验结果评估。如果采集到测量数据，则按 7.2.5.4 d)要求进行数据处理。

表 7 后峰锯齿脉冲试验参数(见图 3)

试验	最小峰值 P g		标称持续时间 T_D ms	
	飞行器设备[a]	地面设备	飞行器设备[a]	地面设备
坠撞安全	40	75	11	6
[a] 推荐用于无缓冲装置和重量小于 136kg 的装备。				

7.2.6 程序 VI——工作台操作

7.2.6.1 概述

该试验的目的是确定装备在典型工作台上维护和修理时，承受冲击的能力。所有可能经历工作台或类似工作台上维修的装备都要进行该试验。它主要考核装备结构和功能的完好性。

7.2.6.2 控制

确保试件与真实装备的功能完全相同。将试件的一边抬高到高出坚固木质工作台面 100mm，或使底盘与工作台面形成 45°夹角，或达到平衡点，取其中高度最低的(工作台面厚度至少应为 4.25cm)，按规范要求进行一系列跌落试验。试验中使用的高度是由一些典型的实际跌落数据来确定的，这些跌落通常是由工作台技术人员和装配人员造成的。

7.2.6.3 试验允差

确保试验跌落高度允差在 7.2.6.2 中规定的跌落高度的 2.5%以内。

7.2.6.4 试验步骤

程序 VI 的步骤如下：

a) 在进行功能和结构检查后，按实际使用状态装配试件，例如，拆除机壳的底盘和前壁板组件，按使用状态安置试件。试件在试验期间一般不工作。

b) 用一条边作为转轴，把底盘的另一边抬高，抬高到下列条件之一出现(取决哪一个先发生)：

   1) 底盘抬高的那边已高出水平工作台面 100mm；

   2) 底盘与水平工作台面成 45°角；

   3) 底盘被抬高的那边正好处在完全平衡点下方。

c) 使底盘自由跌落到水平工作台面上，以同一水平面的其他可用边作为转轴，依此重复上述过程，共计跌落 4 次。

d) 对试件其余的放置面重复 b)和 c)，使试件在实际使用中可能放置的每个面都进行了总计 4 次跌落试验。

e) 进行试件外观检查。

f) 记录试验结果。

g) 按技术文件的规定使试件运行。

h) 记录试验结果，并与 a)中得到的数据作比较。

7.2.6.5 结果分析

按 GJB 150.1A－2009 中 3.17 进行试验结果评估。通常，应记录试件在功能上或结构上与 7.2.6.4 a)的所有差别，并加以分析。

7.2.7 程序 VII——铁路撞击

7.2.7.1 概述

该试验的目的是确定普通铁路车辆在运输中撞击对装备的影响，以检验装备的结构完好性并评估系紧系统与系紧程序的适应性。

7.2.7.2 控制

7.2.7.2.1 试验设施/设备

试验设施/设备包括：

a) 铁路缓冲车辆。优选空车作为缓冲或冲击车辆，也可以使用合适的负载的车辆。无论哪种情况，缓冲车辆的总重量至少应为 113400kg。第一辆缓冲车辆应是标准的牵引装置车，如果可能的话，其他的缓冲车辆也应是标准牵引车。

b) 试验车辆。配置有链条系紧装置和车尾缓冲的牵引装置车，经批准，也可采用其他类型的铁路车辆。有些装备可能需要用特种车辆作试验，以体现特定的运输方法。

c) 机车。

d) 在缓冲车辆与试验车辆之间需要水平直线轨道，以便允许机车和试验车辆加速到规定的冲击速度，其长度至少为 61m。

e) 如果使用 7.2.7.4.2 的程序进行试验，需用一段小坡度轨道代替机车。

7.2.7.2.2 试验准备

7.2.7.2.2.1 按实际的铁路运输状态安装和固定试件。如果由于安全或其他原因而不能使用代表实际装备的试件时，可以使用一个替代的试件，但它的重量和总体特性应与该装备相同。

7.2.7.2.2.2 在试验之前，装备研制方负责编写运输程序和说明，按实际使用中的情况安装试件，并符合有关加载和固定方法的标准，最多可使用四个系紧点，一般在试件的每端有两个。施加第一个系紧装置从尽可能近的系紧点，但水平方向上不要超出 45°角(侧视)，将附加的系紧连到平台货车的下一个可能的系紧点，在铁路车辆边上采用链条(使链条不交叉)。使用中试件的布置、准备进行试验的制动件和系紧应符合相关技术要求。

7.2.7.2.2.3 除装备运输技术要求中另有规定外，应在试件最大总重量(满负载)下进行试验。

7.2.7.2.3 试验布置

试验布置如下：

a) 缓冲车辆应备有气刹和手刹制动装置，以保证试验安全。如有必要，所有车辆应串接在一起来以挤压连接中的所有松弛部位和缓冲垫。第一节缓冲车辆的撞击端应有标准牵引装置。

b) 将试验车辆置于缓冲车辆与机车之间。

c) 安装下列计时装置(或等效装置)之一，以获取试验车辆的冲击速度：

1) 可测量速度在 0.16km/h 范围内的电子计时器。按制造商的说明书要求把开关触点放在轨道上。

2) 秒表和信号雷管。测量雷管的安装位置。第一枚雷管放在第一节缓冲车辆的有铰链的那边，比试验车前轴和铰链之间的距离大 0.3m 的地方。第二枚雷管放在沿着轨道方向、离第一枚雷管 6.7m 处。表 8 给出了在 6.7m 距离内的运行速度与时间间隔的关系。

3) 测速雷达。为获取准确的速度，测速雷达的安装方向应与冲击方向一致，或按雷达制造商提供的其他说明执行。

d) 拍摄包括所有固定装置的试验布置，如果固定装置有失效，这些记录可能提供有很大价值的信息。

表 8 撞击试验的时间——速度关系(测速距离为 6.7m)

时间 s	速度 km/h	时间 s	速度 km/h	时间 s	速度 km/h	时间 s	速度 km/h
1.0	24.1	1.4	17.2	1.8	13.4	2.2	11.0
1.1	21.9	1.5	16.1	1.9	12.7	2.3	10.5
1.2	20.1	1.6	15.1	2.0	12.1	2.4	10.0
1.3	18.6	1.7	14.2	2.1	11.5	2.5	9.6

表 8(续)

时间 s	速度 km/h	时间 s	速度 km/h	时间 s	速度 km/h	时间 s	速度 km/h
2.6	9.3	5.2	4.6	7.8	3.1	10.4	2.3
2.7	8.9	5.3	4.6	7.9	3.1	10.5	2.3
2.8	8.6	5.4	4.5	8.0	3.0	10.6	2.3
2.9	8.3	5.5	4.4	8.1	3.0	10.7	2.3
3.0	8.0	5.6	4.3	8.2	2.9	10.8	2.2
3.1	7.8	5.7	4.2	8.3	2.9	10.9	2.2
3.2	7.5	5.8	4.2	8.4	2.9	11.0	2.2
3.3	7.3	5.9	4.1	8.5	2.8	11.1	2.2
3.4	7.1	6.0	4.0	8.6	2.8	11.2	2.2
3.5	6.9	6.1	4.0	8.7	2.8	11.3	2.1
3.6	6.7	6.2	3.9	8.8	2.7	11.4	2.1
3.7	6.5	6.3	3.8	8.9	2.7	11.5	2.1
3.8	6.3	6.4	3.8	9.0	2.7	11.6	2.1
3.9	6.2	6.5	3.7	9.1	2.7	11.7	2.1
4.0	6.0	6.6	3.7	9.2	2.6	11.8	2.0
4.1	5.9	6.7	3.6	9.3	2.6	11.9	2.0
4.2	5.7	6.8	3.5	9.4	2.6	12.0	2.0
4.3	5.6	6.9	3.5	9.5	2.5	12.1	2.0
4.4	5.5	7.0	3.4	9.6	2.5	12.2	2.0
4.5	5.4	7.1	3.4	9.7	2.5	12.3	2.0
4.6	5.2	7.2	3.4	9.8	2.5	12.4	1.9
4.7	5.1	7.3	3.3	9.9	2.4	12.5	1.9
4.8	5.0	7.4	3.3	10.0	2.4	12.6	1.9
4.9	4.9	7.5	3.2	10.1	2.4	12.7	1.9
5.0	4.8	7.6	3.2	10.2	2.4	12.8	1.9
5.1	4.7	7.7	3.1	10.3	2.3	12.9	1.9
注：对需要特别关注的货物，如核的、单件的、昂贵的或关键的军用装备，应适当地改变试验程序和判据，这些变更需经有关部门批准。							

7.2.7.3　试验允差

确保试验允差符合 7.2.7.2、7.2.7.4 以及在技术文件中规定的允差范围。

7.2.7.4　试验步骤

7.2.7.4.1　主要程序

本试验的主要程序步骤如下：

a) 对全体乘员简要介绍本程序。当要进行试验时，委派一人通知相关的车上工作人员。命令所有参试人员和参观者注意人身安全，遵守参试运输车辆和单位的安全规定。若可行，进行一次不撞击试件的试验演练以确定准确的速度。

b) 对试件进行四次冲击试验，前三次在同一方向，速度分别为 6.4km/h，9.7km/h 和 13km/h，对速度为 6.4km/h 和 9.7km/h，其速度的允差为±0.8km/h，对速度为 13km/h，允差为+0.8km/h，0.0km/h。

c) 以$13^{+0.8}_{0}$ km/h 的速度进行第四次冲击试验，与前三次不同，冲击试验车辆的另一端。若由于轨道的布局原因而不能将试验车辆换向，也可将试验车辆开到缓冲车的另一端，然后按以上方法冲击。

d) 如果试验中装载的试件或固定装置松驰或失效，拍摄或记录下这些情况。若有必要，调整装载的试件或固定装置，校正系紧装置，继续进行试验，并从 6.4km/h 的速度重新开始进行试验。

e) 将装载试件的铁路车辆拖到远离缓冲车辆的地方。然后，用机车将试验车辆向缓冲车辆方向牵引直到达到要求的速度，释放试验车辆，从而让试验车辆自由地滑向具有连接铰链接头的缓冲车辆。

f) 若装备可以用两个方向装运(例如沿铁路车厢的纵向和横向)，对每个方向应重复四次冲击。

7.2.7.4.2 替代程序

本试验的替代程序步骤如下：

a) 用试验车辆和雷达或其他测速装置对一段小坡度的轨道进行调校。在规定的起始点释放试验车辆，使它沿倾斜的轨道自由地滑下。用雷达测速时，试验车上的乘员用无线电与雷达操作员进行联系，由雷达操作员向试验车的乘员报告车速。无雷达测速时，按同样的原理进行。试验车的乘员在轨道边落下达到所要求速度的位置标记。当确定到了 13km/h 的标记后，可通过手闸停止试验车。在调校过程中，要确保在试验轨道上没有其他车辆。重复调校两次以确保速度位置的准确性。若试验车的乘员很难安全落下标记，难以用手闸停止试验车，可使用自由下滑的机车进行初始调校，由雷达发出指示，当速度达到 13km/h 时，用机车的制动器刹车，标志随刹车同时落下。若需要，可在冲击试验之前，对标记的位置进行调整。

b) 确定了速度位置之后，把缓冲车辆放置在所要求的冲击速度对应的位置，在规定的那个始点释放试验车辆，进行冲击试验。对于不同的试验速度，都需要移动缓冲车辆的位置。

c) 采用 7.2.7.4.1 中所列的冲击速度和方向。

d) 可在倾斜轨道上从与要求速度的对应的调校位置上释放试验车辆，替代缓冲车辆放置在轨道上的不同位置的办法。

e) 在试验期间，如果装载的试件或固定装置松弛或失效，照相或记录下这些情况。若有必要，调整装载的试件或固定装置，校正系紧装置，继续进行试验，并以 6.4km/h 的速度开始重新进行冲击试验。

7.2.7.4.3 附加要求

本程序还应考虑下列问题：

a) 在小于规定速度值时多次重复进行冲击试验。如果有必要，重新调整装载的试件或校正系紧装置，照相并记录下存在的问题。校正系紧装置后，并以 6.4km/h 的冲击速度重新进行所有的冲击试验。只要试件满足 7.2.7.5 的要求，即使试验速度高于要求的速度，也应予认可。

b) 若试验期间系紧铰链或垫块松动，照相并记录下这些问题。由试验负责人通知有关主管部门，并联合决定是否需要重新试验。

7.2.7.5 结果分析

按 GJB 150.1A—2009 中 3.17 进行试验结果评估。若试件、装在其上的物件、试件整体所含的部分脱离、松动或出现超出规定允差的永久变形，则试件未通过试验。同样，试件及其组件在试验后应运行

正常。如果系紧安全装置失效或明显错位，照相并记录下有问题的区域以用来评估使用的程序及装备。试验负责人和有关主管部门共同决定受损的固定装置是否需要重新装配，若要重新改进，是否要重新进行试验。如果试件失效，由所涉及到的各部门共同决定采取必要的措施。若需重新试验，应换用新的系紧装置以消除隐患，若可能，用新试件试验。

7.2.8 程序VIII——弹射起飞和拦阻着陆

7.2.8.1 概述

本试验目的是验证安装在固定翼飞机上或飞机内的装备在承受弹射起飞和拦阻着陆时的功能和结构的完好性。

7.2.8.2 控制

7.2.8.2.1 没有测量数据

由于冲击响应可能受诸如机翼和机身的弯曲振型、弹射/拦阻连接装置和结构阻尼的局部影响，所以试验条件应从装载装备的飞机所测数据获得。虽然与这种环境相关的脉冲幅值较低，但它的作用周期长、出现次数多，对设计不合理的装备有可能造成明显的动态/低周疲劳损伤。一架飞机每年一般出动200架次，其中2/3以上会经受弹射起飞和拦阻着陆。实验室试验时，在两个轴向(纵向和垂向)的每个轴上模拟30次弹射起飞和着陆过程，就能确保发现多数重大缺陷并加以修正。若没有合适的现场测量数据，则可用瞬态正弦来模拟每次弹射或起飞过程。这时，时间历程简化为用具有2s持续时间的瞬态等幅正弦来模拟，在垂向、横向和纵向上的测量数据似乎表明，横向方向的响应与垂直方向的响应相当。为达到试验目的，允许把横向的最大幅值减到垂直方向最大幅值的75%。试验的控制要求如下：

a) 波形：阻尼正弦波；
b) 波形频率：由给定飞机的结构分析和第一阶模态的频率综合确定；
c) 瞬态波的振幅：由给定飞机的结构分析、第一阶模态的频率以及装备在第一阶模态振型上所处的位置确定；
d) 波形阻尼(品质因子)：$Q=20$；
e) 轴向：垂向的、横向的、纵向的；
f) 瞬态波的波数：由特定应用确定(例如，30个波，每次瞬态正弦脉冲后停10s)。

7.2.8.2.2 有测量数据

飞机弹射可由一个瞬态振动分隔的两个冲击来模拟；拦阻着陆可由一次冲击和其后紧跟一个瞬态振动来模拟。弹射起飞和拦阻着陆的冲击与其他典型冲击的差别在于：它是由飞机质量和起落架阻尼特性所确定的较低频的瞬态周期振动(近似正弦)。弹射起飞冲击时间历程波形图5所示。这些数据表示安装在平台挂架上的外挂部件在垂向、横向及纵向方向上所测的加速度响应，是经直流耦合并通过截止频率为70Hz的低通滤波的数据。这三个时间历程表明：它们最初是瞬态冲击，续以持续时间约2s的瞬态振动，最后又是瞬态冲击。纵轴测量数据表明，它含有稳态弹射加速度分量。该分量在试验中不重要，可用高通滤波从时间历程中去掉，高通滤波器的截止频率小于最大加速度冲击响应谱中的最低频率的10%。为达到滤波效果，有必要重复使用高通滤波(除非使用傅立叶变换技术)，开始用较高的截止频率进行滤波，然后减小频率直到最大加速度冲击响应谱中确认的最低频率。一般弹射加速度响应对应于初始加载作用和从飞机弹射分离两个冲击，并由一个振荡加速度分隔开。初始与最后这两个冲击有独特的振荡性质。这个试验应是由一持续时间为2s的瞬态振动分隔的两个瞬时冲击。拦阻着陆的时间历程如图6所示。这些数据代表安装在平台挂架上的外挂部件的垂向、横向及纵向方向上所测的加速度响应。所有数据是直流耦合的并经截止频率为70Hz低通滤波。这三个时间历程都表明：它们开始时是一瞬态冲击过程，接着的是大约持续3s的瞬态振动。很明显，纵向的时间历程有较大的稳态分量，在确定试验规范时可以被滤去。这里提到“瞬态振动”是因为该事件的持续过程并不是典型的冲击过程。

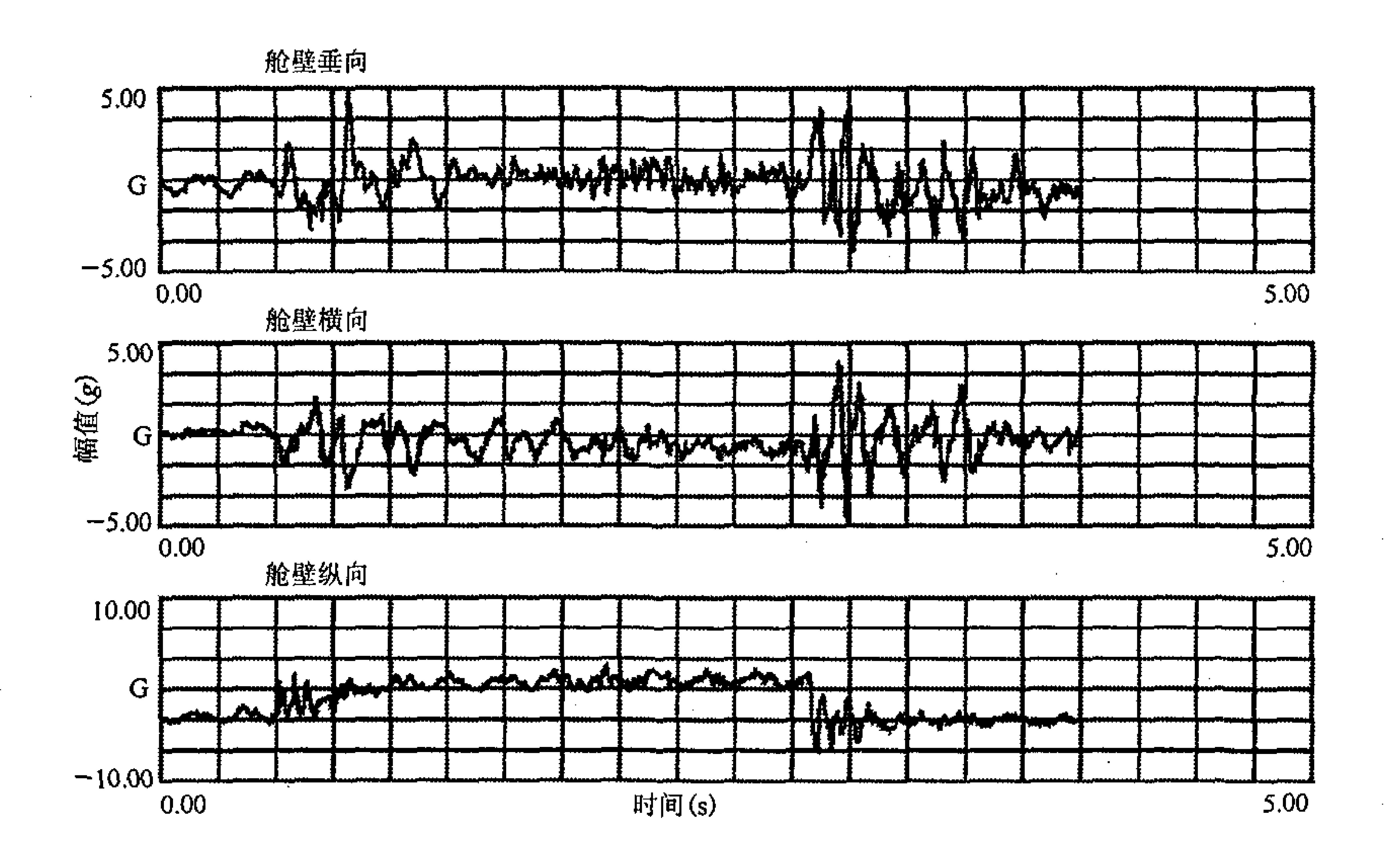


图 5 测量的三轴向弹射起飞部件的加速度响应时间历程

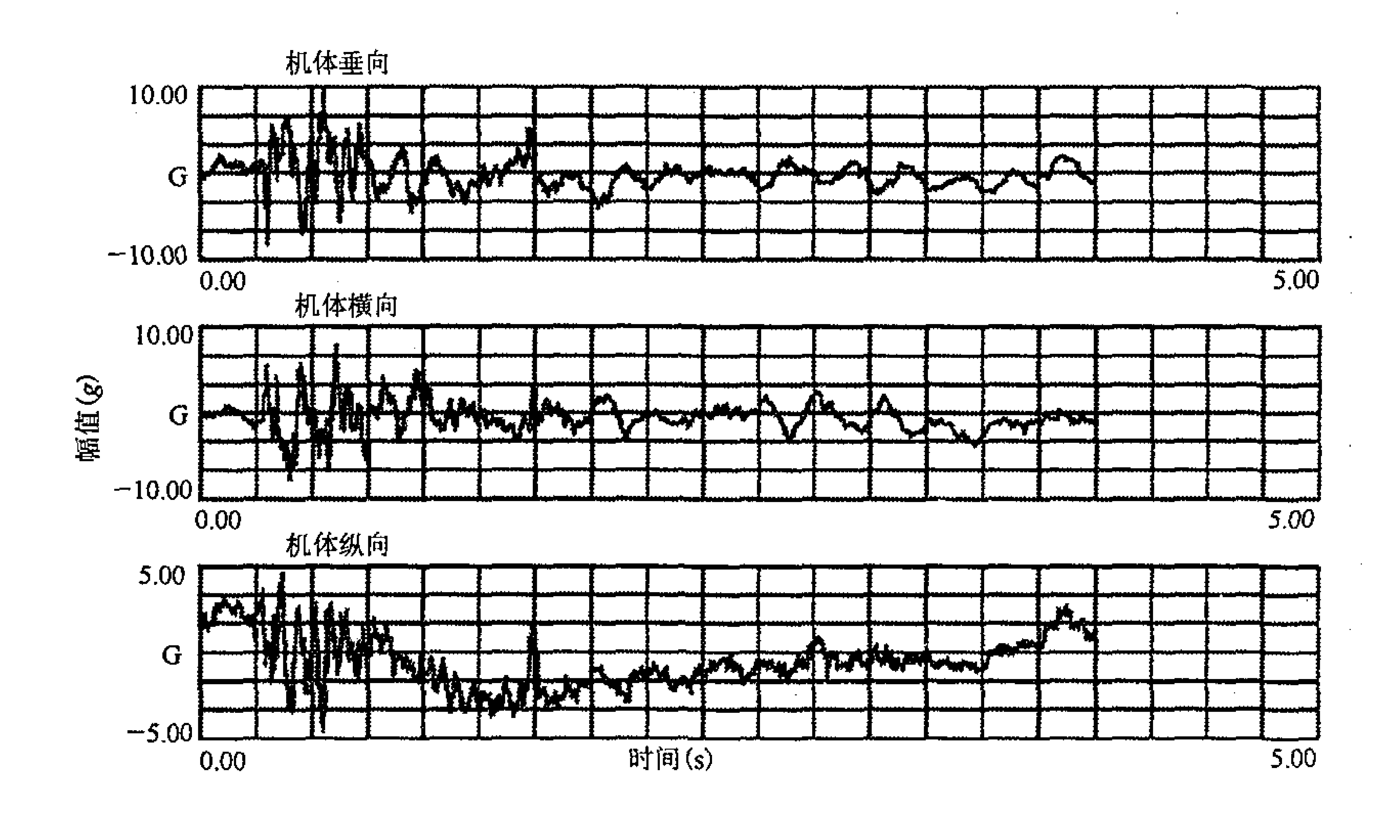


图 6 测量的三轴向拦阻着陆部件的加速度响应时间历程

7.2.8.2.3 瞬态振动

对精确试验室模拟而言，程序 VIII 在处理和复现测试数据中获得的时间历程的波形时，要考虑瞬态振动。由于瞬态振动的持续时间较长(持续时间为 1s 以上)，因而通过假定响应时间历程的一部分和平稳随机数据具有相同特性，可通过估计包络函数 $a(t)$，并计算最大加速度自谱密度(ASD)，对响应时间历程进行处理。这种形式的估计应属于非平稳时间历程的处理，在本方法中将不作深入考虑。瞬态振动现象的重要之处在于：(1)它具有冲击的形式(持续时间短以及振动幅值随时间变化)；(2)可用精确方式建立数学模型；(3)它可用在某些冲击环境的随机模拟。总之，冲击明显在短时间间隔内的能量比瞬态振动大，瞬态振动考虑时间历程的包络函数，而不是对冲击的共振衰减响应的指数包络。

7.2.8.3 试验允差

没有测量数据、波形由结构动态分析后产生时，要确保波形允差在 6.2.2 所规定的时间历程试验允差范围内。有测量数据时，要确保试验响应的冲击响应谱在 6.2.2 所规定的冲击响应谱允差范围内。对于瞬态振动，则要确保波峰和波谷在 6.2.2 所规定波形允差或在试验规范给出的允差范围内。

7.2.8.4 试验步骤

程序 VIII 的步骤如下：

a) 沿第一个试验轴向，将试件安装在冲击设备的振动/冲击夹具上。
b) 按技术文件要求的方式连接试验仪器。
c) 按技术文件的规定进行运行检查和外观检查。
d) 根据现场测量数据的情况，按以下方式处理：
   1) 若无测量数据，在试件的第一个试验轴向上施加几个周期的瞬态正弦波(每一段包含若干周期的瞬态正弦波代表了一个单次的弹射起飞或拦阻着陆)。每个瞬态正弦之后紧随着一段停止时间，以防止非代表性的效应出现。在瞬态正弦作用同时试件按适当的运行方式运行。
   2) 若有测量数据，可在振动台上进行波形控制，实现测量的响应数据(见 GJB 150.20A－2009)，或者把飞机弹射处理为由一个瞬态振动分隔的两个冲击过程，而拦阻着陆可处理为一个冲击其后跟随一瞬态振动。
e) 若试件在试验期间没有故障，按技术文件的规定进行运行检查和外观检查。若出现故障，为避免硬件的进一步损伤，在进行运行检查之前最好进行彻底的外观检查。如果发生了故障，应根据试验目的(工程信息或合同要求)分析故障的性质，考虑修补措施，以便确定是重新试验还是从中断处继续试验。
f) 沿下一个试验轴向，重复 a)～e)。
g) 记录试验信息，包括幅值时间历程曲线和试件所有功能或结构上的性能降低。

7.2.8.5 结果分析

按 GJB 150.1A－2009 中 3.17 进行试验结果评估。在评估中，还应考虑试件、支架或弹射装置结构上的所有故障，这种故障可能不会直接引起装备功能的失效，但却可能会导致在装备服役环境条件下的失效。

附 录 A
(规范性附录)
冲击响应描述方法

A.1 冲击

冲击是指在短时间内作用装备上的高量级输入力脉冲。冲击包括机械冲击、弹道冲击等多种环境。机械冲击环境的频率范围一般不超过 10000Hz，持续时间不超过 1.0s(多数机械冲击，装备的主要响应频率不超过 2000Hz，响应持续时间不超过 0.1s)。图 A.1 为一个实测的连续冲击加速度响应时间历程。根据判断和试验目的，该时间历程可合理分解成几个独立的冲击。

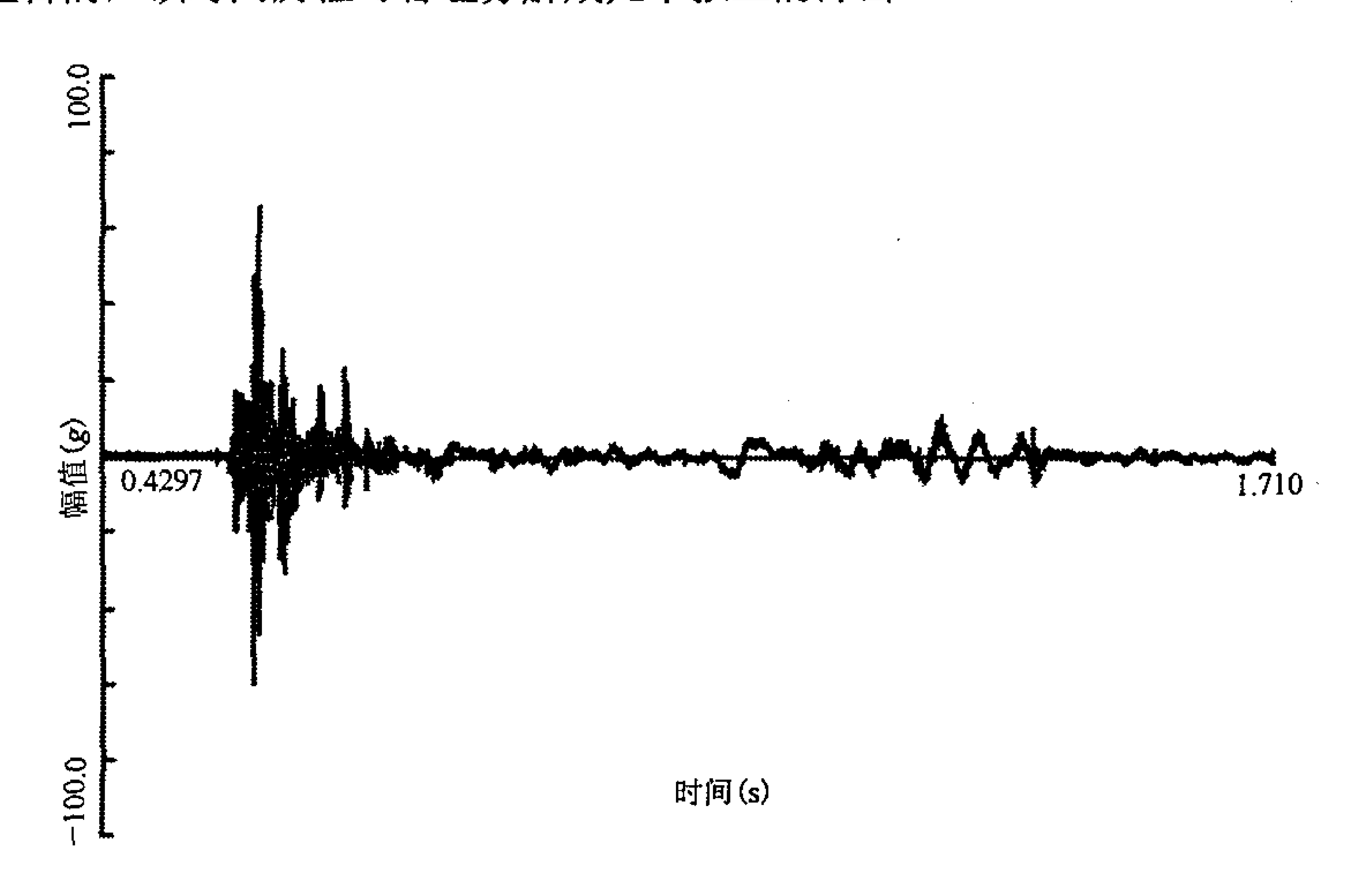


图 A.1 冲击加速度响应时间历程样本

A.2 冲击有效持续时间(T_E 和 T_e)

冲击的有效冲击持续时间有下列两种定义：

a) 冲击的有效持续时间 T_E 是包含绝对值超过 1/3 最大峰值 A_p 的所有时间历程幅值所对应的最小时间长度；

b) 冲击有效持续时间 T_e(对处理复杂瞬态数据更合适)的定义是：包含至少 90%以上的均方根 RMS 时间历程幅值超过最大均方根幅值 10%的时间历程所对应最小时间长度。

图 A.2 说明了图 A.1 所示样本经截断的冲击时间历程的有效持续时间 T_E 和 T_e。由于这种冲击波形的复杂和延长的特点，T_E 和 T_e 相差不大。对于少数复杂冲击时间历程，通常不是这样(见附录 C)。对 T_e 的 90%的技术要求防止了由于幅值超过 10%RMS 的噪声尖峰影响所导致的冲击持续时间过长。应注意 RMS 的估计值是该估计的数据记录长度的函数。对于滑动平均估计，平均的长度至少应为 T_e 的 10%，或指数平均的等效时间常数。图 A.3 给出了图 A.2 所示的时间历程的短时平均 RMS 值的估计以及 T_e。图 A.3 中，短时平均时间大约是 T_e 的 13%。多数情况下，有经验的分析员能够圆满地确定有效持续时间 T_E 或 T_e，用来替代精确的分析定义。为确定有效持续时间 T_E 或 T_e，在对任何测量的瞬态时间历程数据进行处理时，重要的是保存复杂瞬态过程的固有信息和最大限度地减少与仪器噪声有关的信息。

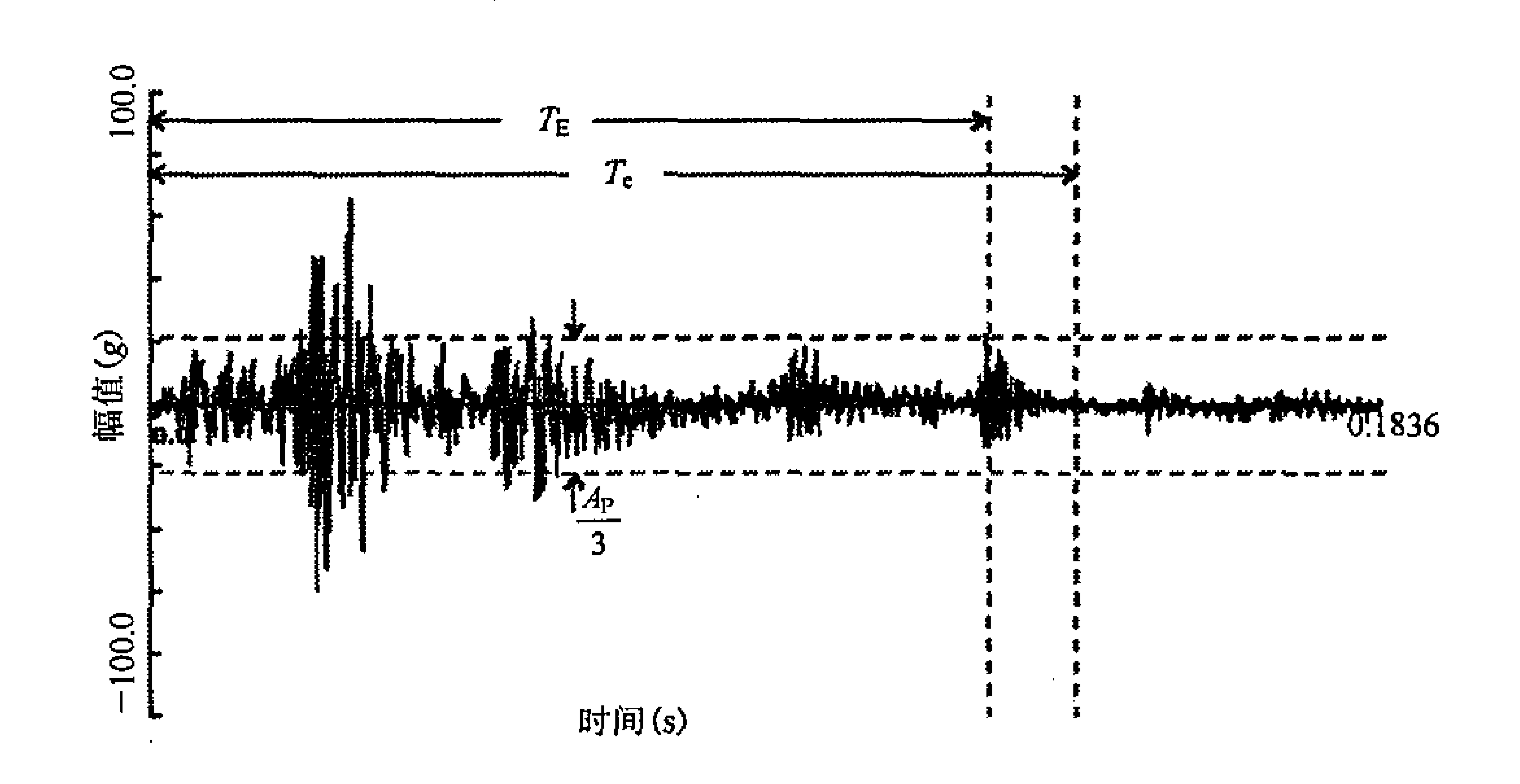


图 A.2 冲击加速度响应时间历程截断样本的有效持续时间 T_E 和 T_e

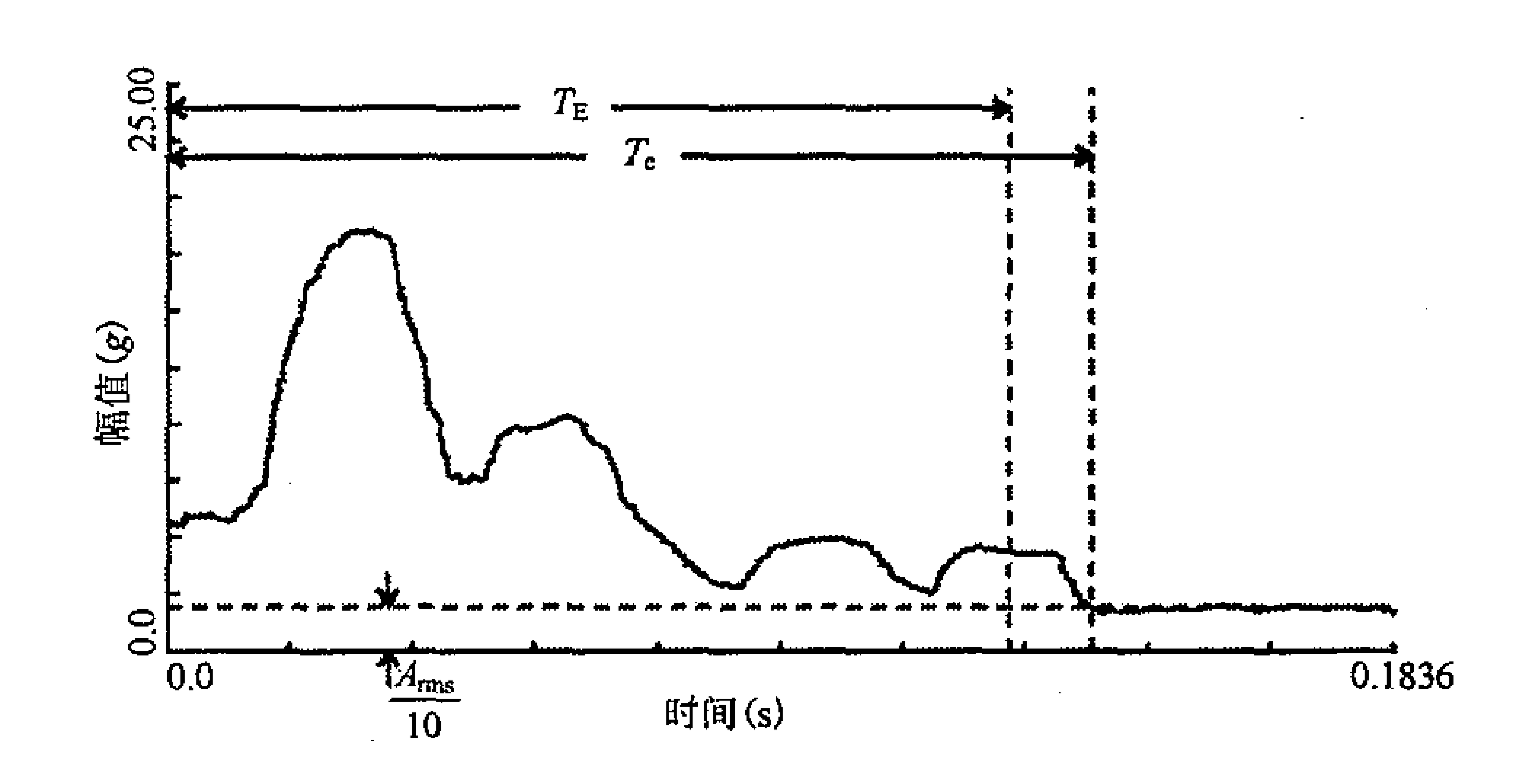


图 A.3 冲击加速度响应时间历程截取后样本的短时间平均 RMS
(平均时间约为 T_e 的 13%)

A.3 冲击响应谱(SRS)

在给定分析频率 f_n 上的冲击响应谱值 SRS 定义为：一个无阻尼振动固有频率为 f_n 的单自由度(SDOF)系统上作用一个给定的基础输入时质量的最大响应。基础输入是在一个规定的持续时间内的实测冲击(规定的持续时间应当是有效持续时间 T_e)。单自由度系统的阻尼特性用“Q”(品质因子)表示，$Q=\frac{1}{2\xi}$，其中 ξ 为阻尼比。Q 为 50 表示 1%的临界阻尼，Q 为 10 表示 5%的临界阻尼，Q 为 5 表示 10%的临界阻尼。在实验室模拟时，Q 可取 10 和 50 两个值，分别对应较大阻尼和较小阻尼，可为分析人员提供更广范围装备响应的信息。冲击响应谱曲线的横座标是单自由度系统的固有频率，纵座标是最大响应加速度。冲击响应谱的频率范围从所感兴趣的最低频率一直到该谱达到平直段时的频率。对高端频率的要求是保证不忽略任何高频分量，最低频率由装备的频率响应特性确定。对于感兴趣的最低频率 f_{min}，冲击响应谱的计算从冲击的第一个幅值上升开始，到 T_e 或 $1/2f_{min}$(两者取较大者)。

按响应的参变量和最大响应选取的不同，冲击响应谱可分为多种形式。在冲击分析中，常用的冲击响应谱包括下列形式：

a) 最大绝对加速度冲击响应谱。冲击响应谱值为一个单自由度系统上作用一个给定的基础输入时，质量的最大绝对加速度响应峰值的绝对值。最大绝对加速度冲击响应谱的单位是 g；

图 A.4 表示了图 A.2 所示有效持续时间为 T_e 的冲击时间历程的最大加速度冲击响应谱。

b) 最大伪速度冲击响应谱。冲击响应谱值为一个单自由度系统上作用一个给定的基础输入时质量的最大绝对加速度除以单自由度系统的无阻尼固有圆频率、或者最大相对位移乘以单自由度系统的无阻尼固有圆频率。除了频率较低的区域以外，这两种计算方式基本上给出相同的谱。在频率较低的区域，后一种计算方法是更为基本的最大伪速度冲击响应谱的定义。最大伪速度冲击响应谱的单位是 m/s；图 A.5 表示最大伪速度的冲击响应谱。单自由度系统的最大伪速度冲击响应谱更能代表冲击带来的潜在危害，因为它与单自由系统各元件的应力应变有关。

c) 最大等效静态加速度冲击响应谱。冲击响应谱值为一个单自由度系统上作用一个给定的基础输入时质量的最大相对位移乘以单自由度系统的无阻尼固有圆频率的平方。最大等效静态加速度冲击响应谱的单位是 *g*。

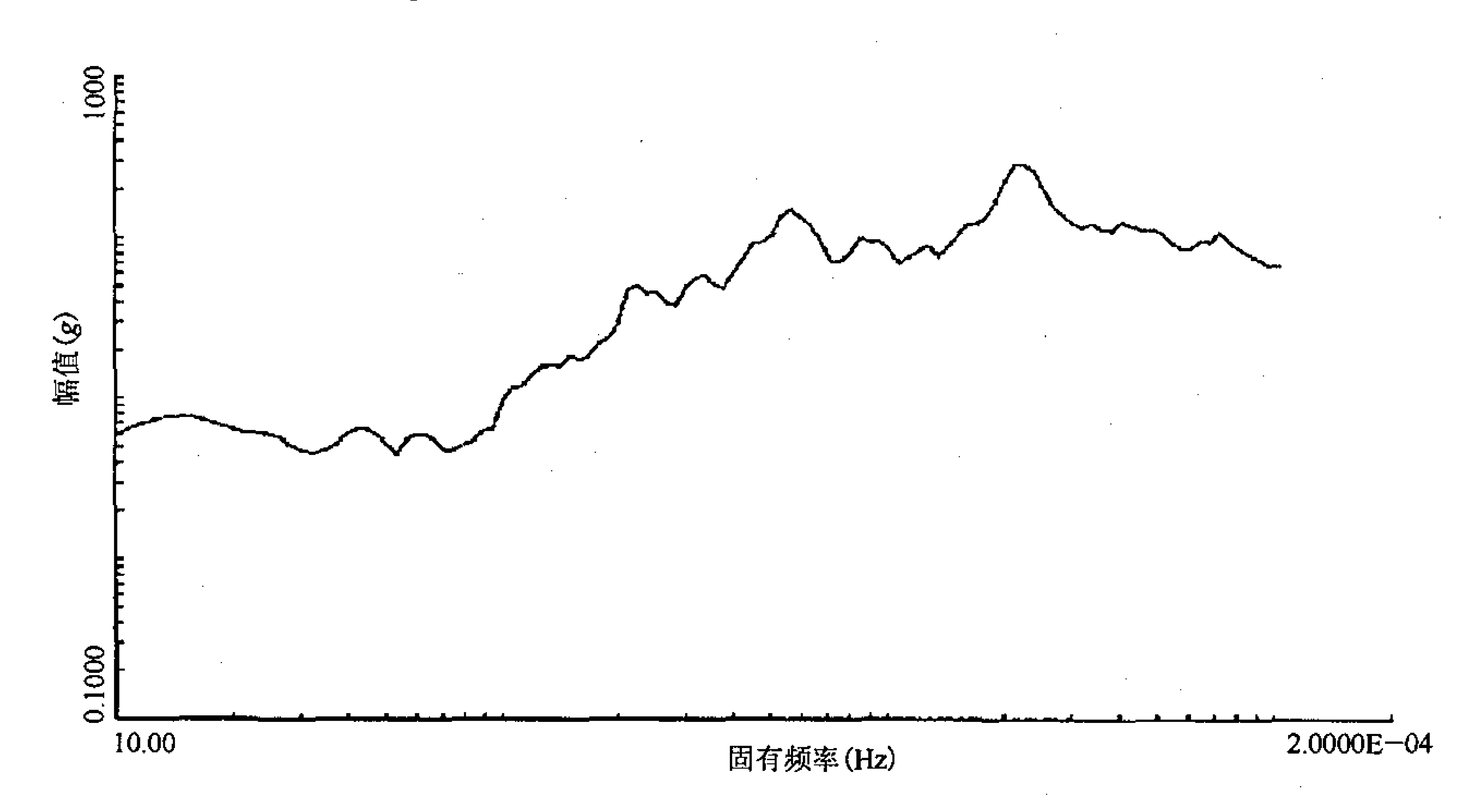


图 A.4 冲击加速度响应样本的最大 SRS

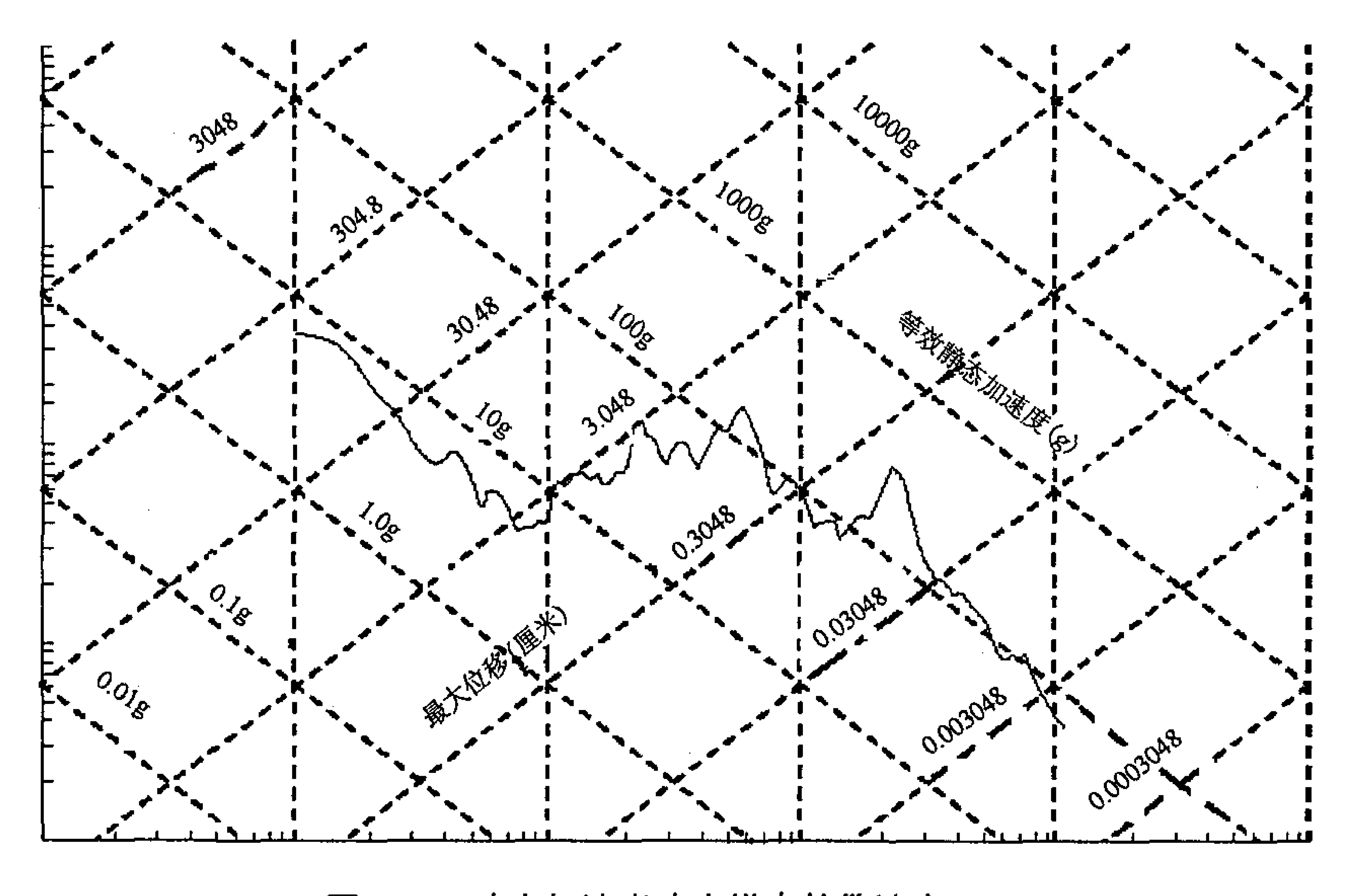


图 A.5 冲击加速度响应样本的伪速度 SRS

A.4 能量谱密度(ESD)

对于有效持续时间为 T_e 的冲击时间历程 $x(t)$，其有限傅立叶变换见式(A.1)：

$$X(f)=\int_0^{T_e} x(t)e^{-j2\pi ft}dt,\ -\infty<f<\infty \qquad \text{(A.1)}$$

$x(t)$ 的能量谱密度函数估计见式(A.2)：

$$\hat{L}_{xx}(f)=\begin{cases}2|X(f)|^2 & f>0\\ |X(f)|^2 & f=0\\ 0 & f<0\end{cases} \qquad \text{(A.2)}$$

能量谱密度的单位是 $g^2\cdot$s/Hz。

在进行能量谱密度估计时，重要的是选择快速傅立叶变换数据块的大小，应使整个冲击都包含在该数据块内，用补零的方法(即用零代替噪声数据)消除超出冲击有效持续时间 T_e 以外的多余噪声。能量谱密度可用来比较多个冲击在频域内的能量分布。图 A.6 表示了图 A.2 所示冲击时间历程的能量谱密度估计。对于一次能量谱密度估计值，归一化的随机误差百分比为 100%，通过对 n 个相邻能量谱密度值平均或者对 n 次独立的、但统计上等效的能量谱密度估计值平均，可使归一化随机误差的百分比减小到 $\frac{1}{\sqrt{n}}$。

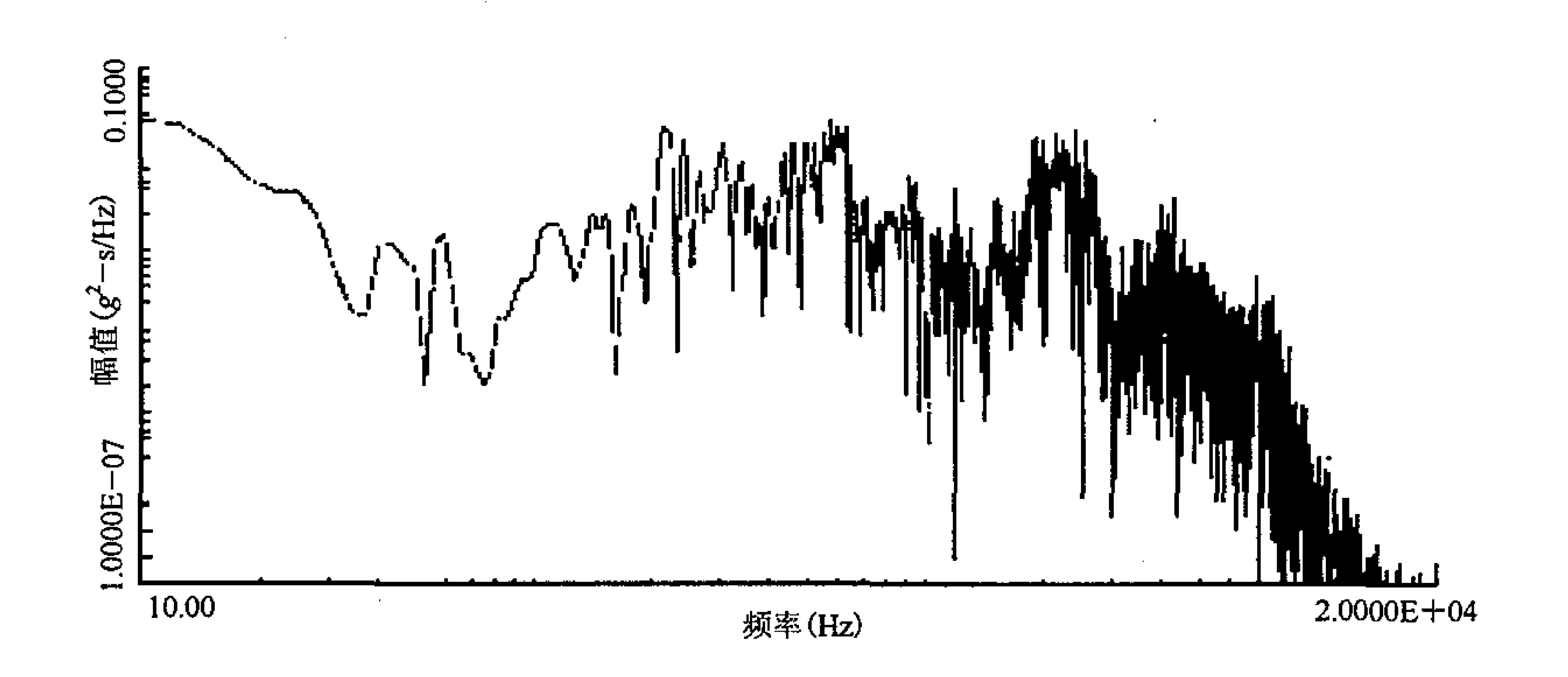


图 A.6 冲击加速度响应的 ESD 估计

A.5 傅立叶谱(FS)

对于有效持续时间 T_e 的冲击时间历程 $x(t)$，其有限傅立叶变换见式(A.3)：

$$X(f)=\int_0^{T_e} x(t)e^{-j2\pi ft}dt,\ -\infty<f<\infty \qquad \text{(A.3)}$$

$x(t)$ 的傅立叶谱估计见式(A.4)：

$$\hat{F}_{xx}(f)=\begin{cases}2|X(f)| & f>0\\ |X(f)| & f=0\\ 0 & f<0\end{cases} \qquad \text{(A.4)}$$

傅立叶谱的单位是 $g\cdot s$。

在进行傅立叶谱估计时，为使整个冲击都包含在该数据块内，重要的是选择快速傅立叶变换块的大小。并用补零的方法(即用零代替噪声数据)消除超出冲击有效持续时间 T_e 以外的多余噪声。FS 用来描述在冲击中整个频带上显著的频率分量。图 A.7 表示了图 A.2 所示冲击时间历程的傅立叶谱估计。对于一次傅立叶谱估计，归一化的随机误差百分比为 100%。通过对相邻 n 个傅立叶谱的平均或对 n 次独立

的，但统计上等效的傅立叶谱估计值平均，可以使归一化的随机误差百分数减少到$\frac{1}{\sqrt{n}}$。

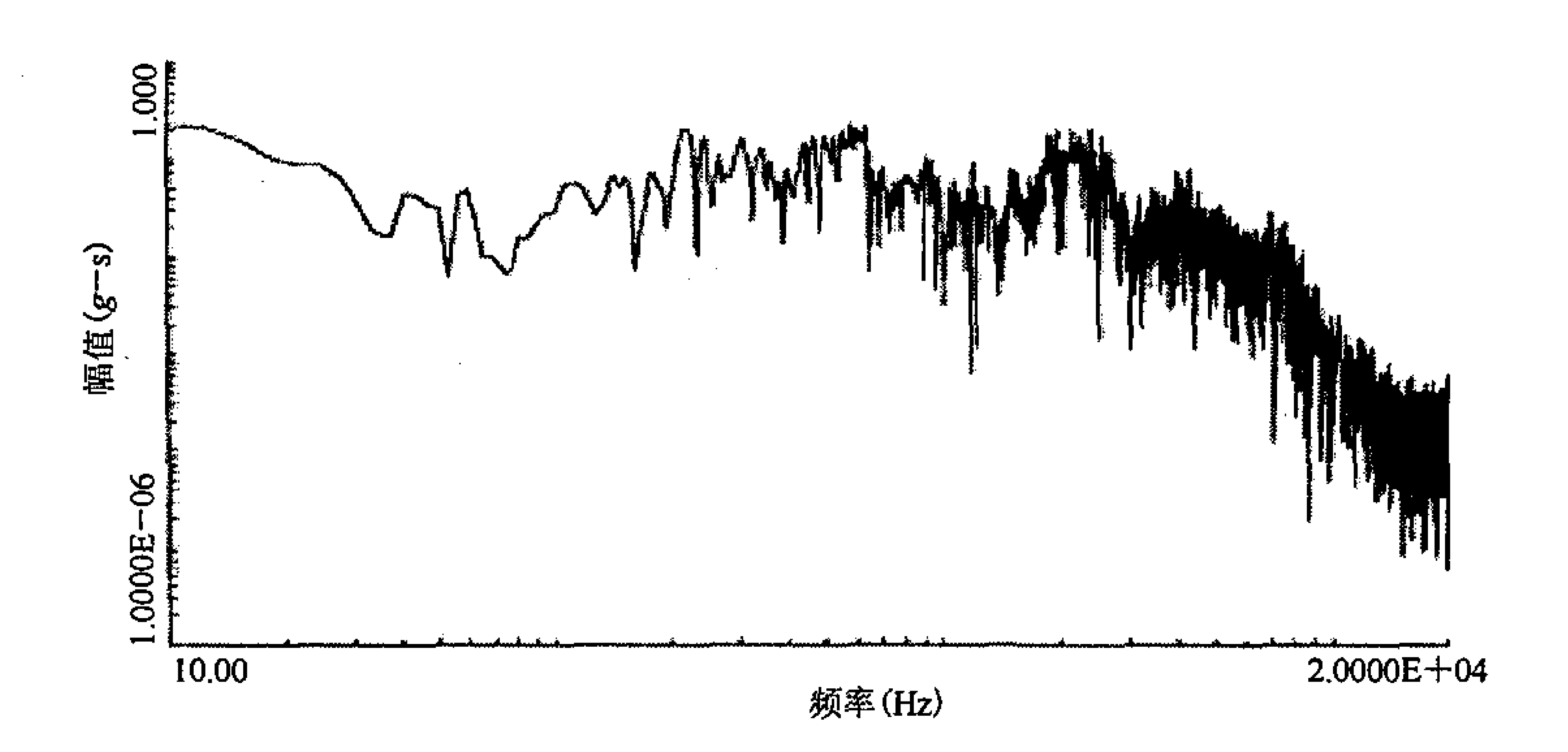


图 A.7　样本冲击加速度响应傅立叶谱估计

附 录 B
（规范性附录）
数据集上限的统计分析方法

B.1 范围

B.1.1 目的

为定义统计意义的数据集上限，本附录提供了与一组数据集统计特性有关的信息。

B.1.2 应用

本附录的信息广泛适用于频域估计，这些估计可以根据给定信息进行的预示，或者也可以是按适当方法在频域内进行处理的时域测量数据，例如：对于平稳的随机振动，处理方法选取自功率谱密度(ASD)；对于一个很短的瞬态过程，则应选取冲击响应谱、能量谱密度或傅立叶谱。所给的频域信息估计，可用统计方法确定这些数据集的上限值。

B.2 推导

B.2.1 基本的估计假设

B.2.1.1 预示的估计、测量的估计或预示与测量的估计的组合都可以用相同的方法处理。假设单个测量的不确定度(处理误差)不影响上下限的估计，经数字化处理的外场测量的数据，例如 SRS、ESD、FS 或 ASD 估计，是从单个样本记录中得到的，通常以无偏统计归纳的方式来检验和归纳“相似”的估计数据。为了确保估计无偏置，与测量目的相符的测量点可随机选取。

B.2.1.2 相似估计定义为：

a) 在装备上的一个位置点上的估计已在基本相同的试验条件下通过重复试验获得；
b) 在一个系统上的估计，已通过一次试验获得，这些估计点来自于在响应上具有某种程度相似的几个相邻点，或者不同位置上具有相似响应的点组成的一个“区”；
c) 前两种情况的某种组合。

B.2.1.3 无论哪种情况，假设分析频带上估计值之间都存在一定程度的均匀性。对后一个假设一般要求：

a) 对于给定频率点的一组估计，没有引起大的样本估计偏差的明显奇异值；
b) 对于所测系统，较大的激励输入可得到较大的估计值。

B.2.2 基本估计的归纳预处理

归纳有两种方法。第一种是在基本估计值上利用“包络”来获得环境的保守估计，以及与包络有关的某些对基本估计值散布的定性估计，这种方法取决于分析人员的判断，通常无法提供一致的结果。第二种是用统计方法来组合基本的估计值，并根据概率分布推导出估计值的统计显著性。所涉及的估计值及其统计特性和要处理的数据通常具有相同的频带。但对给定的频带，由于在分析频带上幅值分布函数未知，整个估计值的统计特征不易得到。多数情况下，如果对估计值进行以 10 为底的对数计算，将这些独立的估计转换成归一化形式，则分布函数可假定为正态。对 ESD 和 FS 估计，对相邻分量(假设统计上相互独立)进行平均计算，在增加估计值自由度的同时，可能由于引入统计偏置而降低频率分辨率。对 ASD 估计，如果估计中偏置误差很小，即滤波分辨率带宽是估计带宽的一小部分，则对相邻分量进行平均很有用。对 SRS 估计，由于是基于随固有频率而改变的单自由度系统的最大响应，相邻估计趋向于统计相关，因此平均的平滑效果不好，除非用很窄的频率间隔来计算 SRS；此时，在更宽的频率间隔上，用 1/6 倍频程代替 1/12 倍频程重新处理时间历程数据，对 SRS 估计进行平滑处理更好。不能重新处理、又没有好的数学方法来平滑相关的 SRS 估计时，可接受的替代方法是用某种包络估计。如果试验中都是无偏测量，则样本量越大，估计的对数变换越接近正态分布。最后注意：由下面内容所得到

的上限估计是被频谱折点处的折线段所平滑。本附录未提供进行“平滑”或“包络”的指南，例如：估计是否应被截断或包络处理，估计值的带宽与截断程度的关系等。这种平滑仅可由有经验的分析人员进行。

B.2.3　参数的上限统计估计假设

在一组有 N 个预测或测量值$\{x_1, x_2, \cdots, x_N\}$的统计上限估计的公式中，假设：(1)将对估计值进行对数变换，以使总测量集更接近正态分布样本。(2)忽略测量选取偏置误差。由于正态分布和 t 分布是对称的，下面的公式通过改变均值与标准偏差值之间的符号为负，就可用于下限估计。这里假设所有的估计都是在单一的频率或频带上处理的，并且在这些带宽上估计是独立的，所以每一个分析带宽可单独处理，整个频率段的结果作为频率的函数汇总到一个图上。对于式(B.1)：

$$y_i=\log_{10}(x_i) \qquad i=1, 2, \cdots, N \tag{B.1}$$

真实均值 u_y 的估计值 m_y 由式(B.2)给出：

$$m_y=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}y_i \tag{B.2}$$

真实标准差 σ_y 的无偏估计 s_y 由式(B.3)计算：

$$s_y=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i-m_y)^2}{N-1}} \tag{B.3}$$

B.2.3.1　NTL——正态单边容差上限

正态单边容差上限的 $NTL(N, \beta, \gamma)$ 见式(B.4)：

$$NTL(N, \beta, \gamma)=10^{m_y+s_yK_{N,\beta,\gamma}} \tag{B.4}$$

式中：

$K_{N,\beta,\gamma}$——正态单边容差因子，表 B.1 给出了不同 N，β 和 γ 值对应的 $K_{N,\beta,\gamma}$ 值；

NTL——(原始估计集的)正态单边容差上限，表示 $100\beta\%$的估计值以置信度 $100\gamma\%$低于正态单边容差上限 $NTL(N, \beta, \gamma)$。对于 $\beta=0.95$ 和 $\gamma=0.50$，可以称为 95/50 极限。

这种估计方法不适用于 N 值较小、且 β 和 γ 接近于 1 的情况，因为这与假设估计值的对数变换为正态分布相违背。

B.2.3.2　NPL——正态预测上限

正态预测上限，由式(B.5)给定：

$$NTL(N, \gamma)=10^{m_y+s_y\sqrt{1+\frac{1}{N}}t_{N-1;\alpha}} \tag{B.5}$$

式中：

$\alpha=1-\gamma$；

$t_{N-1;\alpha}$——自由度为 $N-1$ 的 t 分布在分布百分点 $100\alpha=100(1-\gamma)$处的变量；

γ——超出的下一个预测或测量值的置信系数。由于在推导过程中存在的假设，这个估计需要详细说明在给定位置或区上的测量值。

B.2.4　非参数上限统计估计假设

B.2.4.1　概述

若经对数变换的数据不满足正态分布，就不应使用上面定义的参数极限值。应使用非参数上限估计值，即不依赖于估计值分布假设的极限值。此时，不需变换估计的数据。所有估计的假设都适用于非参数估计，采取进一步的处理可以计算出下限。

表 B.1 容差上限的正态容差因子

N	γ=0.50			γ=0.90			γ=0.95		
	β=0.9	β=0.95	β=0.99	β=0.9	β=0.95	β=0.99	β=0.9	β=0.95	β=0.99
3	1.50	1.94	2.76	4.26	5.31	7.34	6.16	7.66	10.55
4	1.42	1.83	2.60	3.19	3.96	5.44	4.16	5.14	7.04
5	1.38	1.78	2.53	2.74	3.40	4.67	3.14	4.20	5.74
6	1.36	1.75	2.48	2.49	3.09	4.24	3.01	3.71	5.06
7	1.35	1.73	2.46	2.33	2.89	3.97	2.76	3.40	4.64
8	1.34	1.72	2.44	2.22	2.76	3.78	2.58	3.19	4.35
9	1.33	1.71	2.42	2.13	2.65	3.64	2.45	3.03	4.14
10	1.32	1.70	2.41	2.06	2.57	3.53	2.36	2.91	3.98
12	1.32	1.69	2.40	1.97	2.45	3.37	2.21	2.74	3.75
14	1.31	1.68	2.39	1.90	2.36	3.26	2.11	2.61	3.58
16	1.31	1.68	2.38	1.84	2.30	3.17	2.03	2.52	3.46
18	1.30	1.67	2.37	1.80	2.25	3.11	1.97	2.45	3.37
20	1.30	1.67	2.37	1.76	2.21	3.05	1.93	2.40	3.30
25	1.30	1.67	2.36	1.70	2.13	2.95	1.84	2.29	3.16
30	1.29	1.66	2.35	1.66	2.08	2.88	1.78	2.22	3.06
35	1.29	1.66	2.35	1.62	2.04	2.83	1.73	2.17	2.99
40	1.29	1.66	2.35	1.60	2.01	2.79	1.70	2.13	2.94
50	1.29	1.65	2.34	1.56	1.96	2.74	1.65	2.06	2.86
∞	1.28	1.64	2.33	1.28	1.64	2.33	1.28	1.64	2.33

B.2.4.2 ENV——上限

最大上限是通过在数据集中选取最大估计值来确定的，见式(B.6)：

$$ENV(N)=\max\{x_1, x_2, \cdots, x_N\} \qquad (B.6)$$

这种估计的主要缺点是估计集的分布特性被忽略，无法给出超过该值的概率。在估计集中有异常值的情况下，*ENV*(*N*)可能过于保守。*ENV*(*N*)对估计的带宽也很敏感。

B.2.4.3 DFL——无验前分布容差上限

使用未变换样本值的无验前分布容差上限定义为：置信度为 γ 时，所有样本值的至少 100β%的样本值将低于最大预测或测量值上限，这个极限是基于有序统计考虑，见式(B.7)：

$$DFL(N, \beta, \gamma)=x_{max};\ \gamma=1-\beta \qquad (B.7)$$

式中：

x_{max} ——估计集的最大值；

β ——低于 x_{max} 的比例数；

γ ——置信度系数。

N，β 和 γ 之间不能独立选取。这是因为：

a) 给定 *N*，假定一个 β 值(0≤β≤1)，则可确定置信度 γ；

b) 给定 N 和 γ，则可确定比例数 β；

c) 给定 β 和 γ，则可确定样本数量，并使 β 和置信度得到满足(对于统计试验设计)。

$DFL(N, \beta, \gamma)$ 对于小样本量数据($N \leqslant 13$)和相对较大的 β 值($\beta > 0.95$)可能无意义，$DFL(N, \beta, \gamma)$ 对估计带宽很敏感。

B.2.4.4 ETL——经验容差上限

经验容差上限利用原始样本值，并假设预测或测量估计集由在 M 个频率分辨率带宽上的 N 个测量点，总共有 NM 个估计值组成，即：

$$\{x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{1M}; x_{21}, x_{22}, \cdots, x_{2M}; x_{N1}, x_{N2}, \cdots, x_{NM};\}$$

其中 m_j 是在所有 N 个测量点上，第 j 个频率带宽上的平均估计，见式(B.8)：

$$m_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{ij} \qquad (j=1, 2, \cdots, M) \cdots\cdots (B.8)$$

m_j 用来构造每个频率分辨率带宽上获得的归一化估计集，即：

$$\{u\} = \{u_{11}, u_{12}, \cdots, u_{1M}; u_{21}, u_{22}, \cdots, u_{2M}; u_{N1}, u_{N2}, \cdots, u_{NM};\}$$

其中：$u_{ij} = \frac{x_{ij}}{m_j}$ ($i=1, 2, \cdots, N$; $j=1, 2, \cdots, M$)。

归一化的估计集 $\{u\}$，是按从小到大排序的，且 $u_\beta = u_{(k)}$，其中 $0 < \beta = \frac{k}{NM} \leqslant 1$，对于 $u_{(k)}$ 是集 $\{u\}$ 中的第 k 个有序元素。对于每个频率分辨率带宽，有

$$ETL(\beta) = u_\beta m_j = x_{\beta j} \quad (j=1, 2, \cdots, M) \cdots\cdots (B.9)$$

用 m_j 意味着在 j 频率分辨率带宽上，$ETL(\beta)$ 值以 50%的置信度超过这一值有 100β%个，如果选择大于 m_j 以外的值，置信度会增加。使用这个极限时，估计集应是一致的，即在所有的频带段上有几乎相同的散布。测量点数 N 通常应大于 10。

B.3 例子

B.3.1 输入试验数据集

表 B.2 给出了均值为 3.5，具有单位方差的正态分布的数据。该表有 $N=14$ 行 $M=5$ 列(行表示 14 次独立的试验测量，而列表示 5 个独立频带上的试验数据)。表 B.2 作为 B.3.2 和 B.3.3 中的确定数据集上限的数据。

表 B.2 输入试验数据组

	$M=1$	$M=2$	$M=3$	$M=4$	$M=5$
$N=1$	3.0674	3.3636	2.0590	2.4435	3.8803
$N=2$	1.8344	3.6139	4.0711	4.9151	2.4909
$N=3$	3.6253	4.5668	3.1001	2.6949	3.4805
$N=4$	3.7877	3.5593	4.1900	4.0287	3.4518
$N=5$	2.3535	3.4044	4.3156	3.7195	3.5000
$N=6$	4.6909	2.6677	4.2119	2.5781	3.1821
$N=7$	4.6892	3.7902	4.7902	1.3293	4.5950
$N=8$	3.4642	2.1638	4.1686	3.4408	1.6260
$N=9$	3.8273	4.2143	4.6908	2.4894	3.9282

表 B.2(续)

	M=1	M=2	M=3	M=4	M=5
N=10	3.6746	5.1236	2.2975	4.1145	4.3956
N=11	3.3133	2.8082	3.4802	4.0077	4.2310
N=12	4.2258	4.3580	3.3433	5.1924	4.0779
N=13	2.9117	4.7540	1.8959	4.0913	3.5403
N=14	5.6832	1.9063	3.7573	2.8564	4.1771

B.3.2 参数上限

正态单边容差上限(NTL)是按 95/50 极限计算，即当置信度为 50%时，至少有 95%的值低于该上限。表 B.1 的 $k_{N,\beta,\gamma}$=1.68。正态预测上限(NPL)是在 95 置信度下以 95%的分布点计算的，其中 $t_{N-1;\alpha}$=$t_{13;0.05}$=1.771。图 B.1 表示了这些数据，而图 B.2 表示了两个参数上限。注意正态预测上限的保守程度超过了正态容差限。

B.3.3 非参数上限

图 B.2 中给出了包络上限(ENV)和无验前分布容差上限(DFL)，DFL 是按样本数 N=14，置信度 γ 为 0.51，β 分位值取 0.95 计算的，这表示了一条曲线的两种解释。图 B.2 中也给出 95%的经验容差上限(ETL)图，表示至少 95%的值在 50%的置信度水平下将低于这个极限。

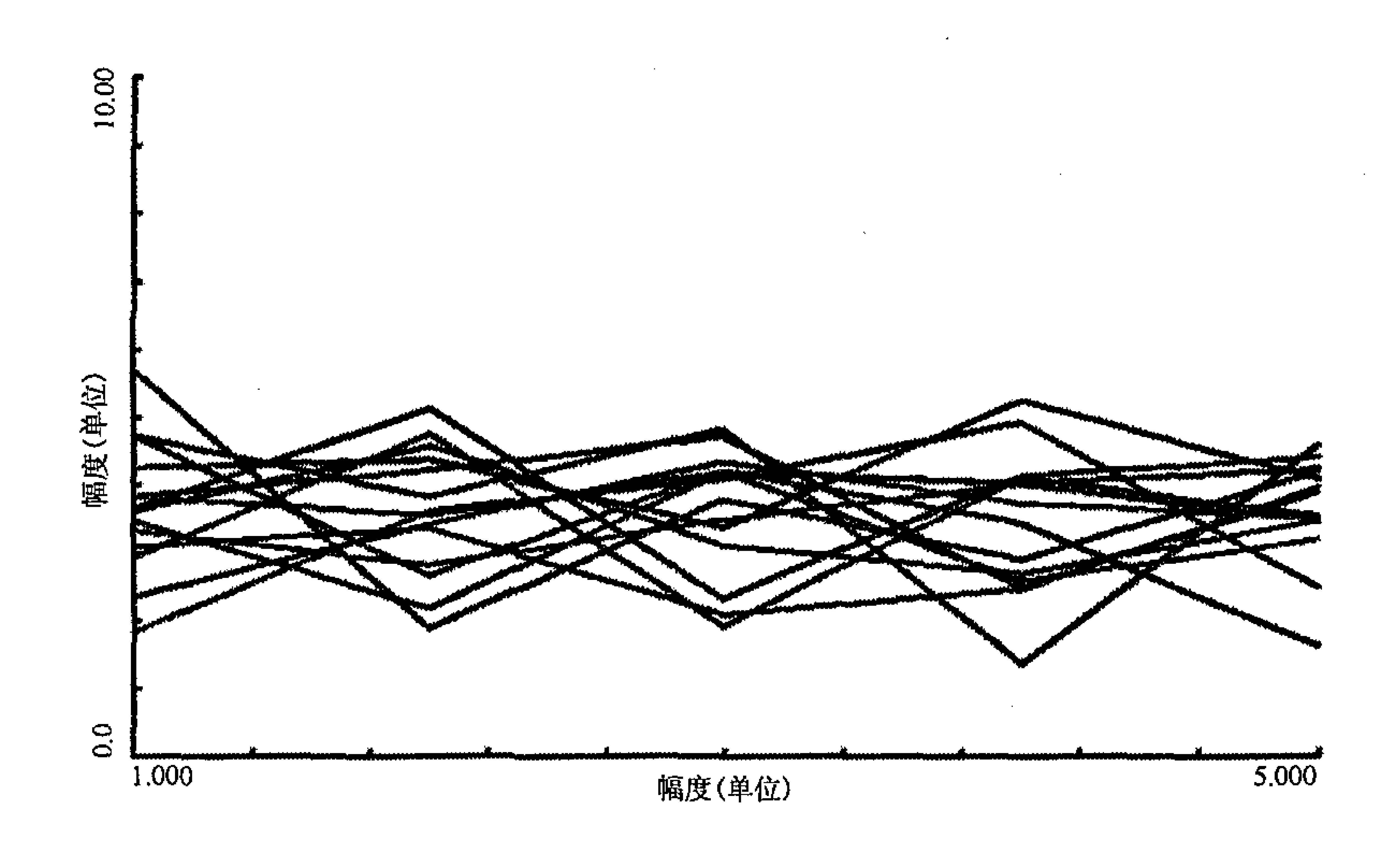


图 B.1 输入试验数据集

B.3.4 观察

图 B.2 中上限的“平坦性”证明了表 B.2 中各数据的一致性。从图 B.2 明显地看出，对所选取的参数的上限不是“统计等效的”。在两个参数上限估计中，如果能够确定数据集经对数变换后近似于正态分布，则使用 NTL 较好。非参数的包络的接近也证实了表 B.2 中数据的一致性。对这个例子至少同时还证明，非统计的 ENV、基于统计的 DFL 以及 ETL 上限在幅值方面是基本一致的。对于不具有一致性的数据集，ETL 可能与 ENV 和 DFL 不一致。对于小的数据集，ETL 可能会随“k”是向上还是向下圆整而变化。

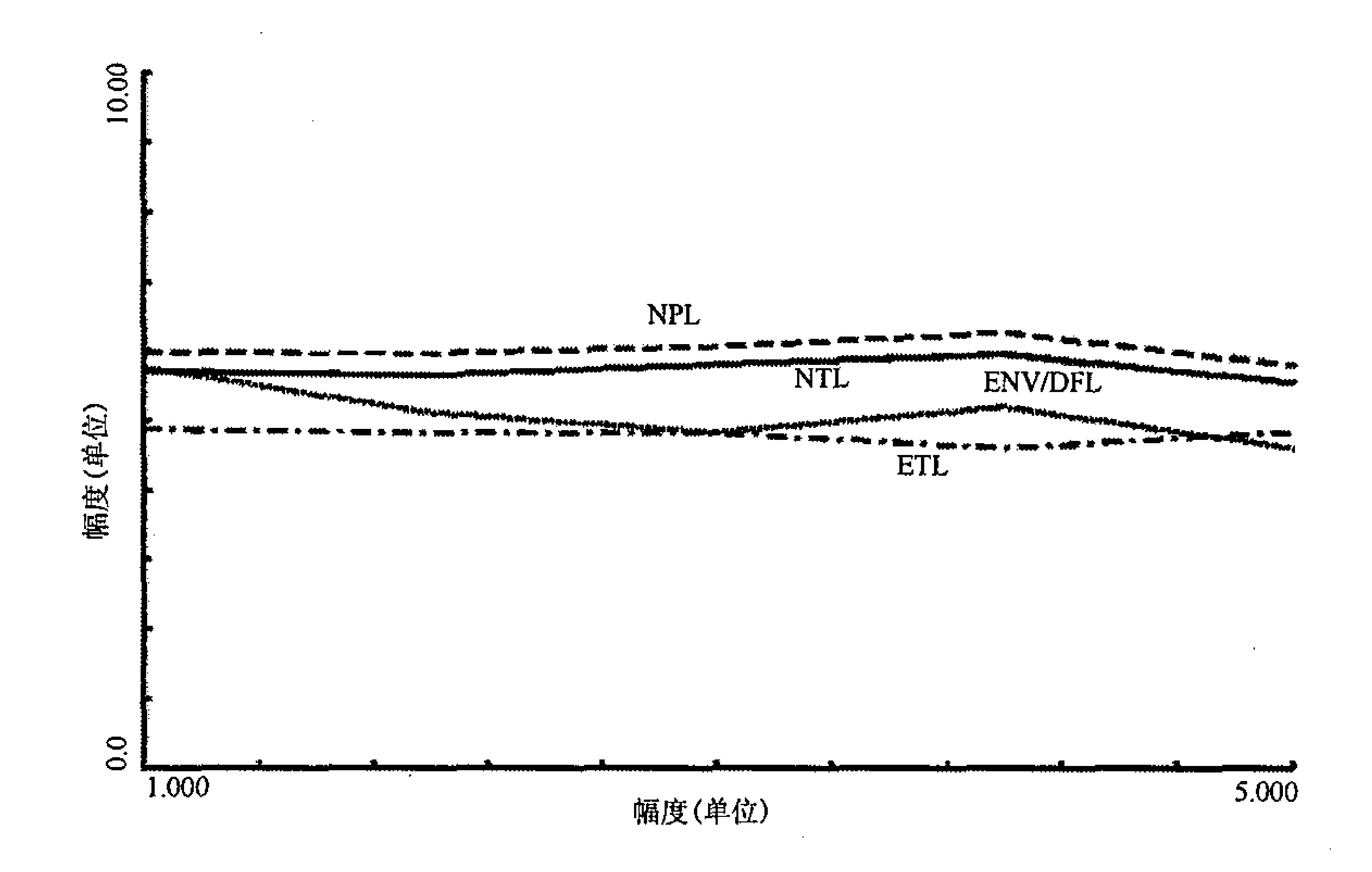


图 B.2　参数和非参数上限

B.3.5　MATLAB 中的 m－函数“ul”

下面是 MATLAB 中的 m－函数“ul”，用于计算规定的上限和任意有关参数。所希望的上限通过 str_in 来输入，有关参数由 par_in 来输入，N 乘 M 阶数据值矩阵由 N 乘 M 矩阵 X_in 输入。在 X_ul 中输出上限估计，函数中计算得到的选定参数在 par_out 中。下面的函数已经用表 B.2 提供的数据矩阵验证过。用户在使用之前，应清楚理解输入变量，并用一个简单的例子验证 m－函数，表 B.2 所示的输入数据是通过下面的 MATLAB 命令产生的：

X_in＝randn(14，5)＋3.5；　……………………………………………(B.10)

```
function [par_out, X_ul]=ul(str_in, par_in, X_in)
%
% ul.m - MATLAB m-function for determining a data array upper limit
%                          11 - may - 1999
%
% Input Information:
%
% str_in - input string specifying the desired upper limit and transform
%
% par_in - input parameters for desired upper limit
%
% X_in - a N by M matrix of data values. N rows in X_in representing individual
%          measurement points. M columns in X_in representing independently
%          processed values. For a specified logarithm transformation of X_in,   all
%          the values in X_in must be positive. For ETL the mean value for a column
%          of X_in must not be zero.
% NTL
%        str_in(1, 4) ='NTLL'--> normal tolerance upper limit with log transform of X_in
%        str_in(1, 4) ='NTLN'--> normal tolerance upper limit of X_in
%        par_in=[N M k_N_Beta_Gamma]--> k_N_Beta_Gamma - one side normal
```

```
%            tolerance interval table value with Beta portion and Gamma confidence
% NPL
%       str_in(1, 4) ='NPLL'--> normal prediction upper limit with log transform of X_in
%       str_in(1, 4) ='NPLN'--> normal prediction upper limit of X_in
%       par_in=[N M Gamma]--> 0 < Gamma= (1 - alpha)<1 - confidence coefficient
%       par_out(1) =t_value--> value of t(N - 1,  alpha)
% ENV
%       str_in(1, 4) ='ENVN'--> maximum upper limit
%       par_in=[N M]
% DFL
%       str_in(1, 4) ='DFLN'--> distribution free upper limit
%       par_in=[N M B G]--> for B=0 or Beta - portion of population
%       par_in = [N M B G]--> for G=Gamma or 0 - confidence coefficient
%       par_out(1) =Beta - if par_in(3) =0 and par_in(4) =Gamma
%       par_out(1) =Gamma - if par_in(3) =Beta and par_in(4) =0
% ETL
%       str_in(1, 4) ='ETLN'--> empirical tolerance upper limit
%       par_in=[N M Beta]--> 0 < Beta < 1 where Beta - portion of population
%                                          less than the upper limit
%       par_out(1) =o_Beta--> ordered value corresponding to Beta
%
%
% Output Information:
%
% par_out - output parameters (if any)
% X_ul - a 1 by M data vector specifying the desired upper limit
%
%
N=par_in(1);
if N > 1
    N_1=N - 1;
    M=par_in(2);
    NM=N * M;
    par_out(1) =0;
    X_ul=zeros(1, M);
    if str_in(1, 4) = ='L'
        X_t=log10(X_in);
    else
        X_t=X_in;
    end
%%% mean of N rows over M columns of X_t
    a=mean(X_t);
    %%% standard deviation of N rows over M columns of X_t
```

```
    s=std(X_t);
    %%% zero par_out and X_ul
    par_out(1)=0;
    X_ul = zeros(1,M);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% NTL - Normal Tolerance Limit %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if str_in(1:3)='NTL'
        k_N_Beta_Gamma=par_in(3);
        if str_in(1, 4)=='L'
            for i=1:M
                X_ul(i)=10^ ( a(i)+k_N_Beta_Gamma * s(i) );
            end
        else
            X_ul=a+k_N_Beta_Gamma * s;
        end
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% NPL - Normal Prediction Limit %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if str_in(1:3)=='NPL'
        t_value=tinv(par_in(3), N_1);
        if str_in(1, 4)=='L'
            for i=1:M
                X_ul(i)=10^ ( a(i)+s(i) * sqrt(1+1/N) * t_value );
            end
        else
            X_ul=a+ ( sqrt(1+1/N) * t_value ) * s;
        end
    par_out(1)=t_value;
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ENV - Maximum Limit %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if str_in(1:3)=='ENV'
        X_ul=max(X_in);
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DFL - Distribution Free Limit %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if str_in(1:3)=='DFL'
        if 1 > par_in(3) > 0
            Gamma=1 - ( par_in(3) ^N );
            par_out(1)=Gamma;
        end
        if 1 > par_in(4) > 0
            Beta=( 1 - par_in(4) ) ^ (1/N);
            par_out(1)=Beta;
        end
        if par_out(1) > 0
            X_ul=max(X_in);
```

```
        else
            STMT='improper Beta/Gamma input is exit function ul'
        end
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ETL - Empirical Tolerance Limit %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if str_in(1:3)=='ETL'
        %%% normalize with respect to the column mean
        X=zeros(1, NM);
        X_o=zeros(1, NM);
        for i=1:N
            for j=1:M
                X(j+(i-1)*M)=X_in(i, j) / a(j);
            end
        end
        %%% order X
        X_o=sort(X);
        ul_index=ceil(par_in(3) * NM);
        if NM >=ul_index > 0
            ul=X_o(ul_index);
            par_out(1)=ul;
            X_ul=ul * a;
        else
            STMT='improper Beta input is exit function ul'
        end
    end
else
    STMT='N < 2 is exit function ul'
end
%
% end of function ul
```

B.4 推荐程序

B.4.1 用于上限估计的推荐统计程序

在所有情况下，在表示数据集上限时，要标明得到上限的方法以及其假设：

a) 当 N 足够大时，如：$N \geqslant 7$，选用 $\beta \geqslant 0.9$，使得 $\gamma \geqslant 0.50$，用 DFL 的表达式确定上限。

b) 当 N 不足够大，不符合 a) 中的准则时，则可使用 NTL 表达式确定上限，选取 β 和 γ 都大于 0.50。β 的变化将决定上限估计的保守程度。

c) 对于 $N > 10$ 且置信度为 0.50 的情况，由 ETL 得到的上限值是可以接受的，并可代替由 DFL 或 NTL 所确定的上限。使用 ETL 方法时，检查和确认所在频带上估计的一致性很重要。

B.4.2 不确定因子

如果数据的置信度较低或数据集过小，上限估计结果中可加入不确定因子，不确定因子取 3dB～6dB。明确定义所有不确定因子非常重要，不确定因子不应叠加到已经包含了不确定因子的估计中去。

附 录 C
（规范性附录）
冲击有效持续时间

C.1 范围

C.1.1 目的

本附录提供了选取冲击有效持续时间 T_e 的基础和理由。

C.1.2 应用

本附录用于在实验室试验时，根据测量数据确定冲击有效持续时间。在试验室中利用振动控制系统合成复杂的瞬态波形重现外场测量环境时，需要满足外场测量的冲击响应谱幅值要求，并且试验室合成的冲击脉冲持续时间应与外场测量的冲击脉冲相符。有时，在一段较长的持续时间内，一个幅值变化的冲击看上去像两个或更多个不同的冲击，外场测量数据在实验室应再现为单个冲击还是多个冲击主要取决于对外场测量环境和试件固有动态特性的了解，以及分析人员的判断。

C.2 推导

C.2.1 冲击包络推导的假设

冲击持续时间主要由测量的冲击时间历程绝对峰值的包络形状确定。假定冲击时间历程中的正负峰值的分布基本相同，即冲击时间历程在正负极性上对称。应清楚：峰值的包络一般是分段的复杂连续函数，无法简单地解析描述。图 C.1 给出了典型冲击时间历程及其包络，还有两组垂直线，一组表示持续时间 T_E，另一组表示持续时间 T_e。图 C.2 显示了其短时平均 RMS 值及一组代表持续时间 T_e 的垂直线。在下面的推导中，假设测量的冲击波形的峰值分布在时间上可分为两段，以上升时间 t_r 为特征的初始段和以衰减时间 t_d 为特征的结尾段．其中通常 $t_d > t_r$。用最大加速度峰值 A_p 对峰值包络进行归一化。假定初始段的包络用三阶多项式形式表示，见式（C.1）：

$$e_r(t) = a_1\left(\frac{t}{t_r}\right) + a_2\left(\frac{t}{t_r}\right)^2 + a_3\left(\frac{t}{t_r}\right)^3 \qquad 0 \leqslant t \leqslant t_r \text{ 且 } a_1 + a_2 + a_3 = 1 \cdots\cdots \text{(C.1)}$$

假设结尾段的包络可用简单指数衰减函数归一化到 A_p 表示，见式（C.2）：

$$e_j(t) = e^{-\alpha\left(\frac{t}{t_r}-1\right)} \qquad t_r \leqslant t \leqslant t_r + t \cdots\cdots \text{(C.2)}$$

初始段在拟合时有三个自由度，结尾段只有一个自由度。通常这两段具有比简单表达式 $e_r(t)$ 和 $e_j(t)$ 更为复杂的形式。一般在高频端的冲击响应谱幅值对初始段形状比对结尾段形状更敏感，而低频端的冲击响应谱对结尾段的持续时间和形状敏感。

C.2.2 T_e 和 T_E 对比

T_E 定义为在冲击波形中，包括所有幅值超过最大峰值的 1/3 数据的最小时间长度。T_e 定义为在冲击波形中，包含至少 90%以上均方根（RMS）时间历程幅值超过 10%的峰值 RMS 幅值的最小时间长度。图 C.3 给出了由以上包络形状模拟得到的冲击波形持续时间 T_E 对 T_e 的散点图，并给出了两个持续时间之间的关系。从这个统计模拟可知，对这一简单的脉冲形式，T_e 与 T_E 的之比的中间值是 2.62，且有 95%的比值落在 1.71 和 5.43 之间。

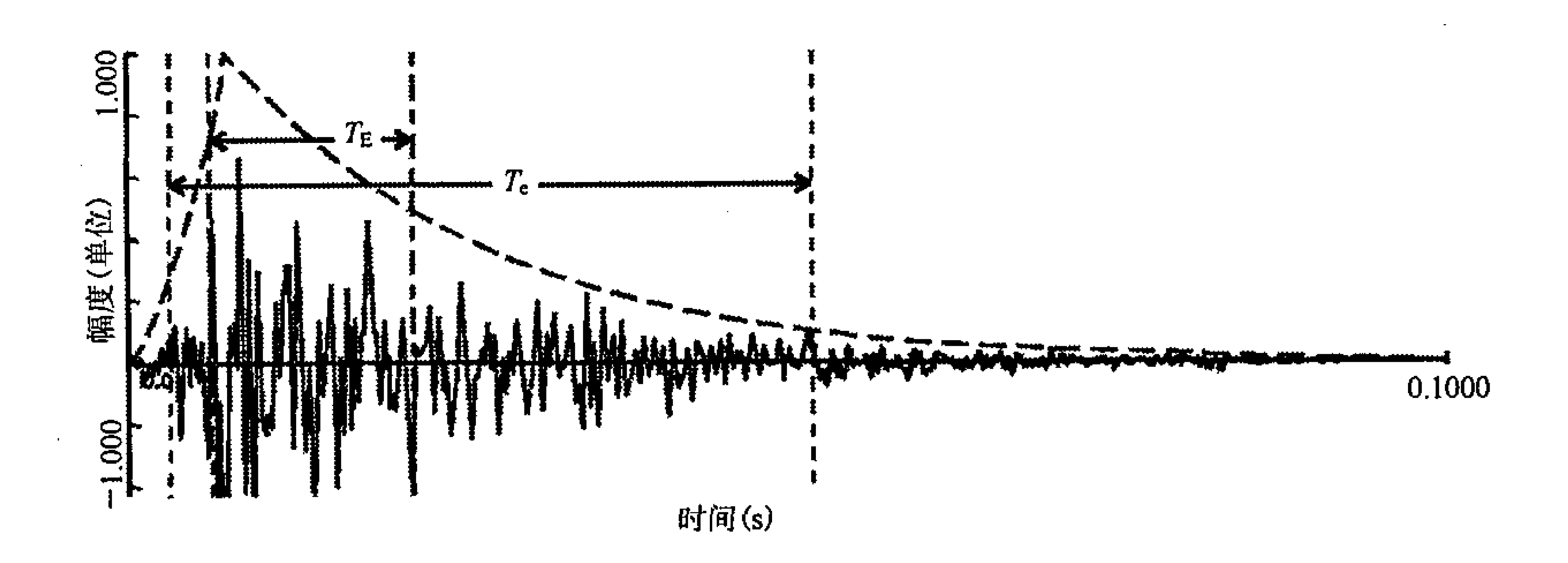


图 C.1 具有包络线的典型冲击时间历程及其 T_E 和 T_e

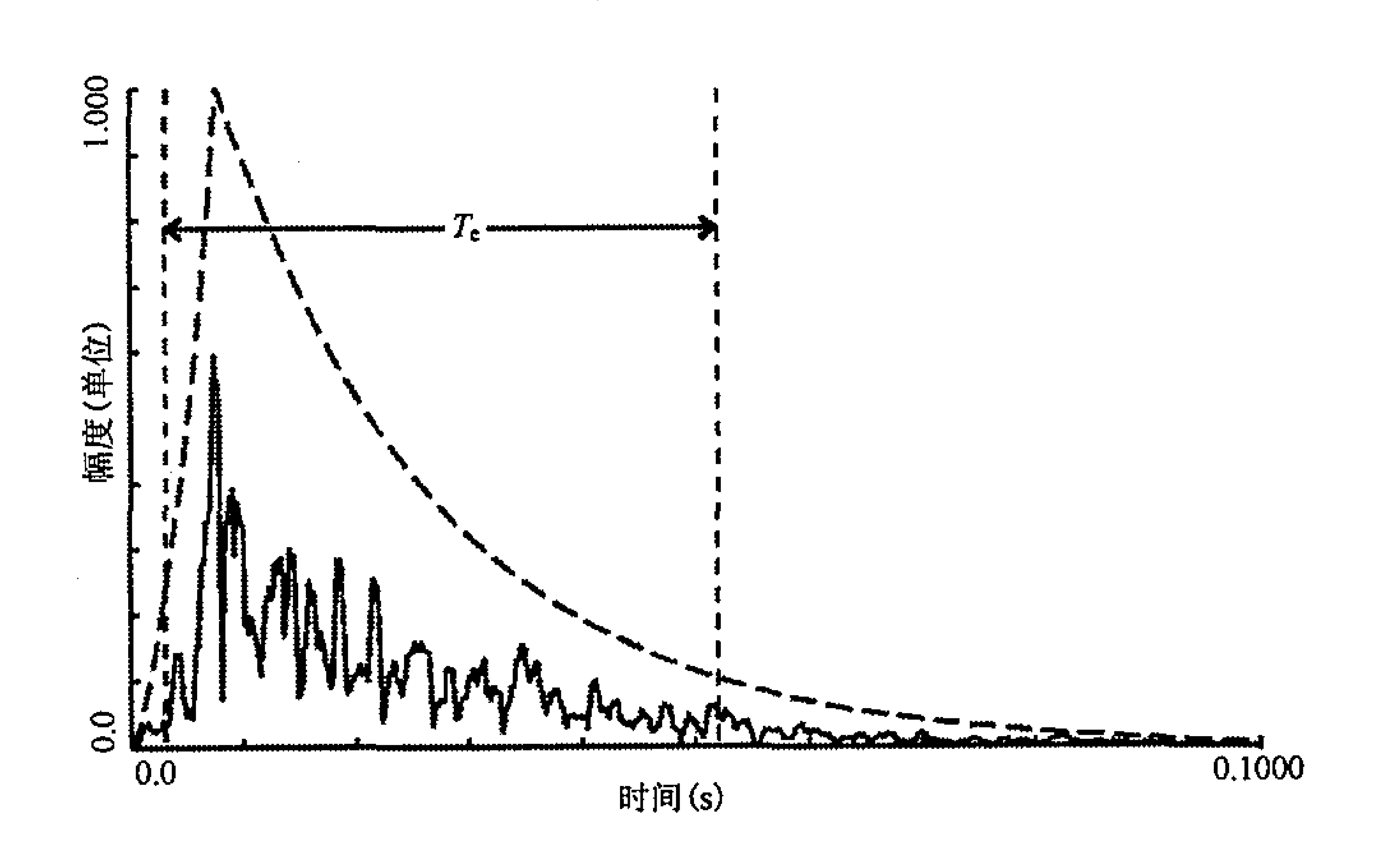


图 C.2 具有包络线的典型冲击 RMS 时间历程及 T_e

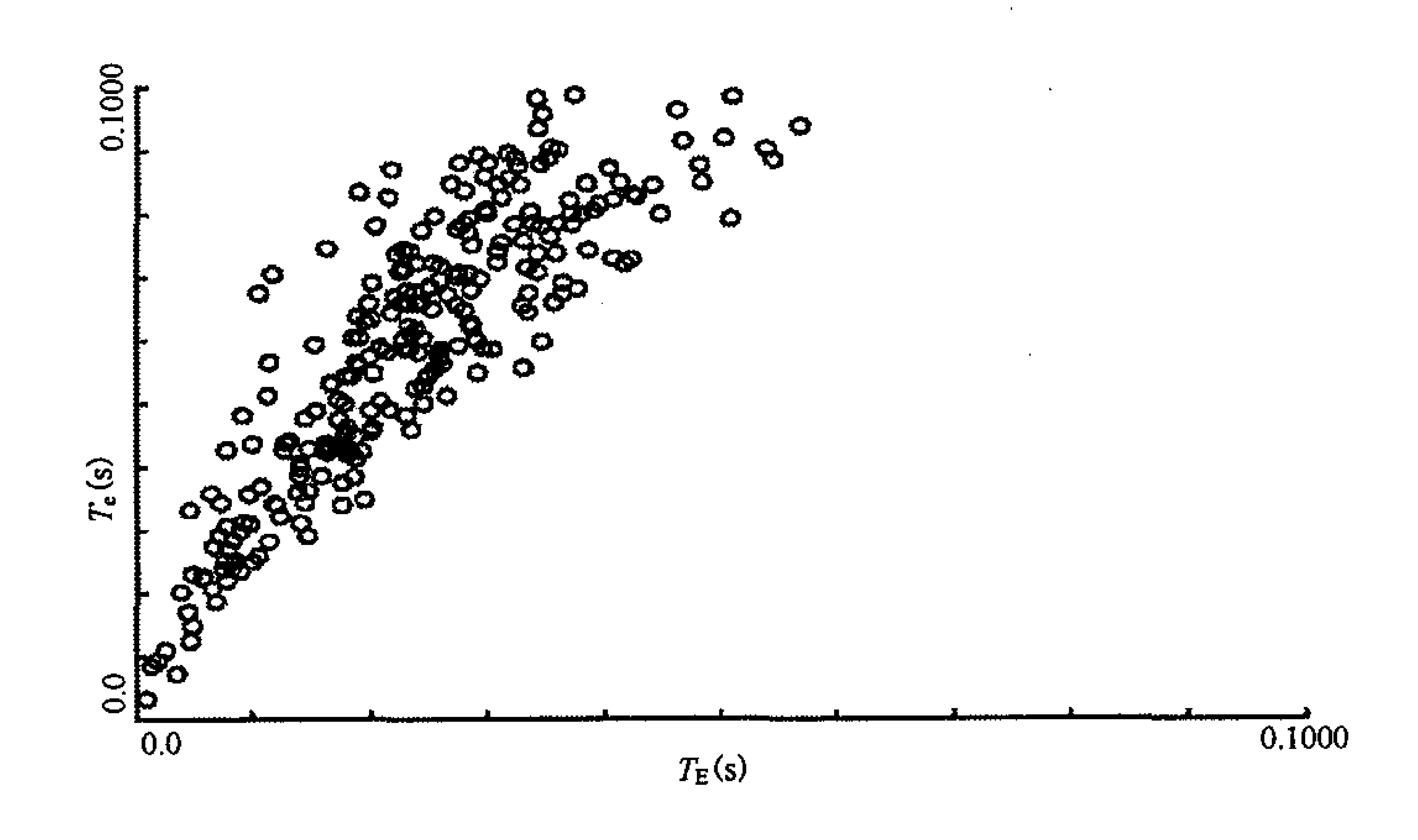


图 C.3 T_E 与 T_e 对比的散布图

C.3 推荐的合成和分析程序

C.3.1 推荐 T_e 的合成

表 1 给出了 T_e 的推荐值，用于取代 T_E。对实验室试验，推荐用 T_e 值作为合成复杂瞬态波形的持续时间，一般 T_e 可近似选作 2.5 倍的 T_E。

C.3.2 T_e 合成中的不确定因素

表 1 给出了有效持续时间 T_e 的范围，对于实验室试验，使用这些 T_e 值来指导确定合成复杂瞬态波形的持续时间。

C.3.3 冲击分析与 T_e 的关系

在冲击中，如持续时间 $T_e > \frac{1}{2f_{min}}$（其中 f_{min} 是冲击响应谱分析的最低频率），计算冲击响应谱时，将冲击脉冲的起始和结束端逐渐减少到零幅值，并将计算时间延伸到过渡区和整个持续时间 T_e 上。在计算冲击的能量谱密度或傅立叶谱时，应确定与持续时间 T_e 相当的最小数据块长度，采用补零方法以消除过大的噪声对谱估计的影响。

附 录 D
（规范性附录）
自功率谱密度与试验冲击响应谱的等效

D.1 范围

D.1.1 目的

本附录用于确定外场测量或预示的平稳随机振动的自功率谱密度产生的环境是否超过外场测量或预估的冲击环境。

D.1.2 应用

对从外场测量或预估的大量级的平稳随机振动中获得的自功率谱密度，若其时间历程幅值明显超过测量或预估的冲击的时间历程幅值，则只需进行平稳随机振动试验。

D.2 推导

D.2.1 自功率谱密度的假设

图 2 为飞行器和地面设备功能性试验的两组自功率谱密度曲线。图 D.1 和图 D.2 分别给出了在 25ms 时间段上飞行器和地面设备试验对应的模拟高斯平稳幅值时间历程。

D.2.2 冲击响应谱假设

图 D.3 和图 D.4 分别为对应图 D.1 和图 D.2 的 250 次模拟时间历程的冲击响应谱曲线，特别是这些冲击响应谱曲线表示了冲击响应谱的平均值、基于 98%的百分位点和 92%的置信度的无验前分布上下容差区间，以及图 1 中规定的冲击响应谱。冲击响应谱是当 $Q=5$，且在大约 1s 的时间间隔(即 10 倍于图 2 中表示的最低频率对应的周期)上计算的。

D.3 推荐程序

D.3.1 对自功率谱密度的推荐程序

对测量的平稳随机振动数据，计算自功率谱密度并与图 2 中的自功率谱密度值比较，滤波器分析带宽最大为 5Hz。若每一频率点上测量的自功率谱密度都超过图中的自功率谱密度，则装备只做随机振动试验。

D.3.2 对冲击响应谱的推荐程序

对测量的平稳随机振动数据，计算自功率谱密度并与图 2 中的自功率谱密度比较，滤波器分析带宽最大为 5Hz。若并非每一频率点上测量的自功率谱密度都大于图中的自功率谱密度，则将测量的随机振动数据采样并计算冲击响应谱，计算时，选择的时间间隔不短于图 2 中的最低频率对应周期的 10 倍。如果冲击响应谱在每一频率点上都超过图 1 上的冲击响应谱，则认为随机振动试验是足够的。如果不是在每一频率点上都超过，则由外场测量或预估的冲击响应谱的数据生成一复杂时域瞬态波形来进行冲击试验。

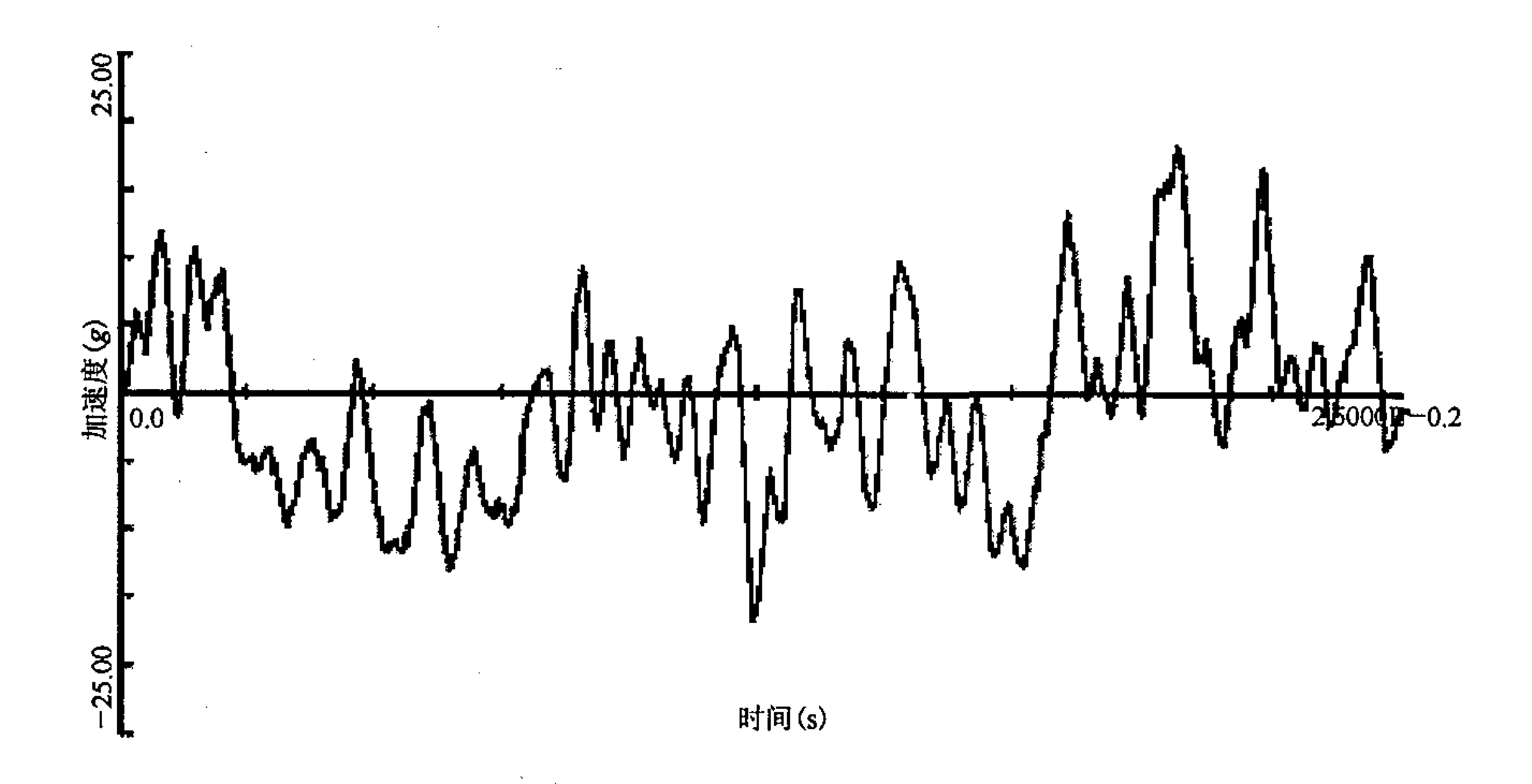


图 D.1　地面设备功能性试验的高斯随机时间历程样本

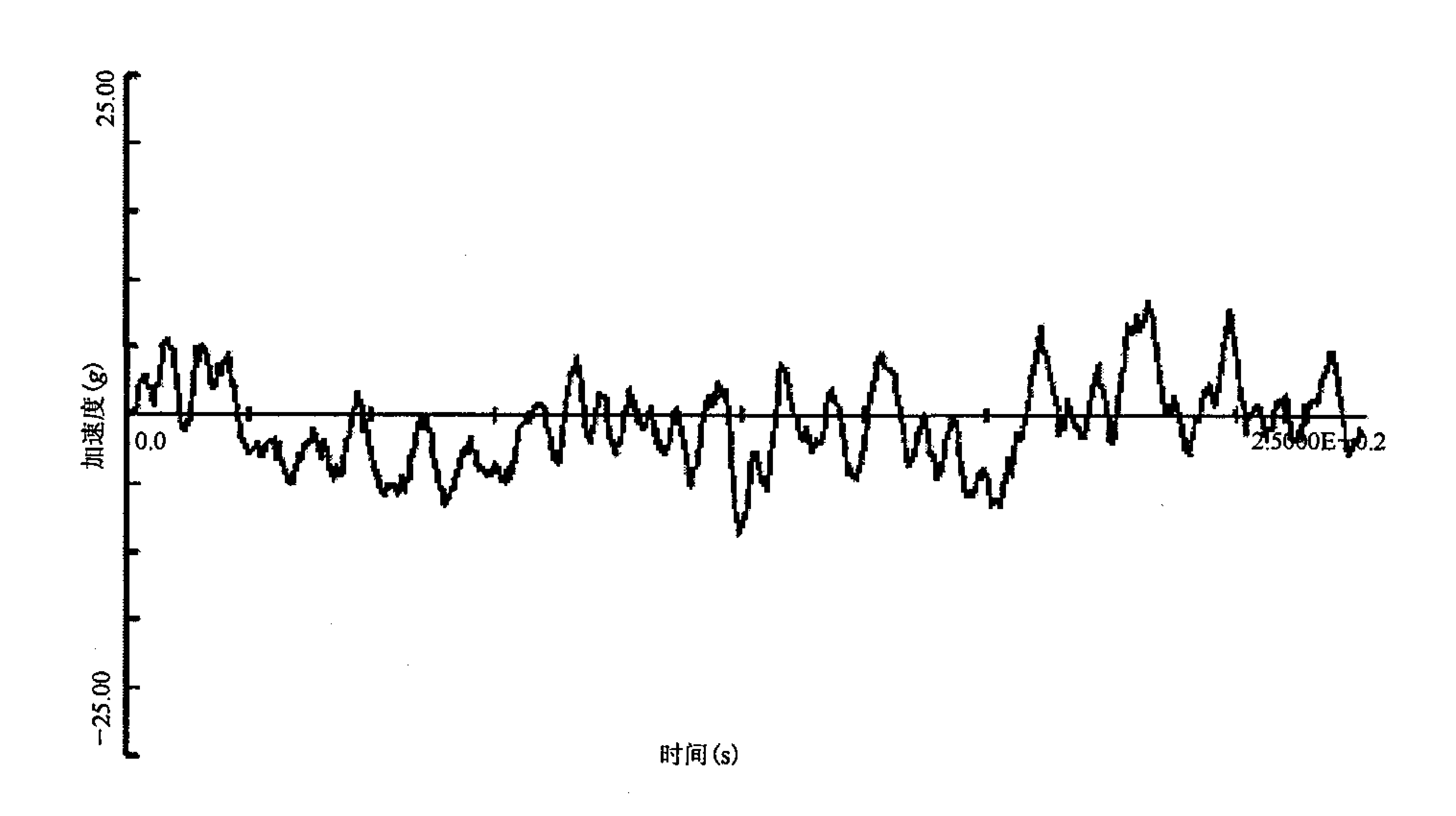


图 D.2　飞行器设备功能性试验的高斯随机时间历程样本

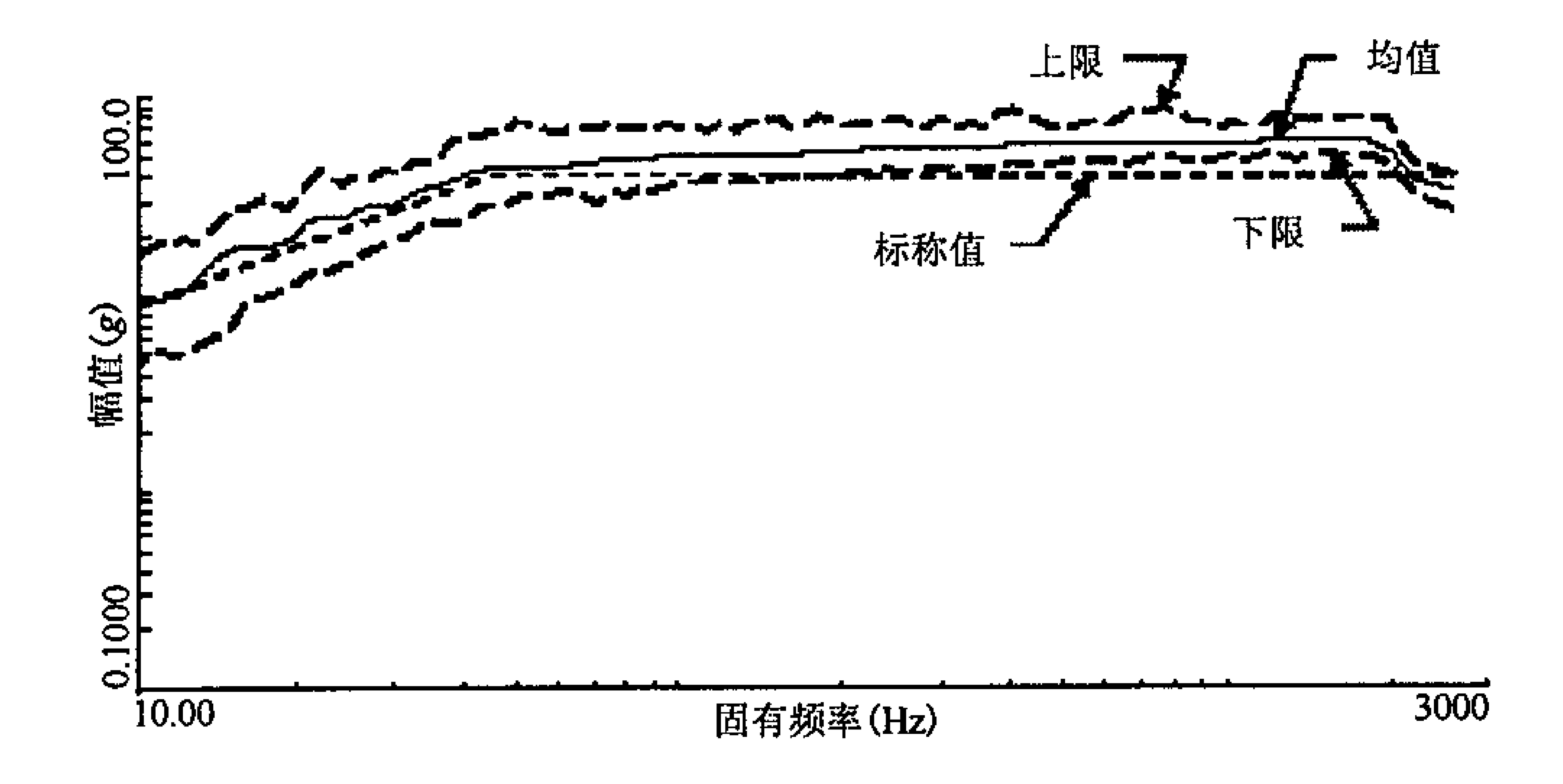


图 D.3　地面设备功能性试验的冲击响应谱比较

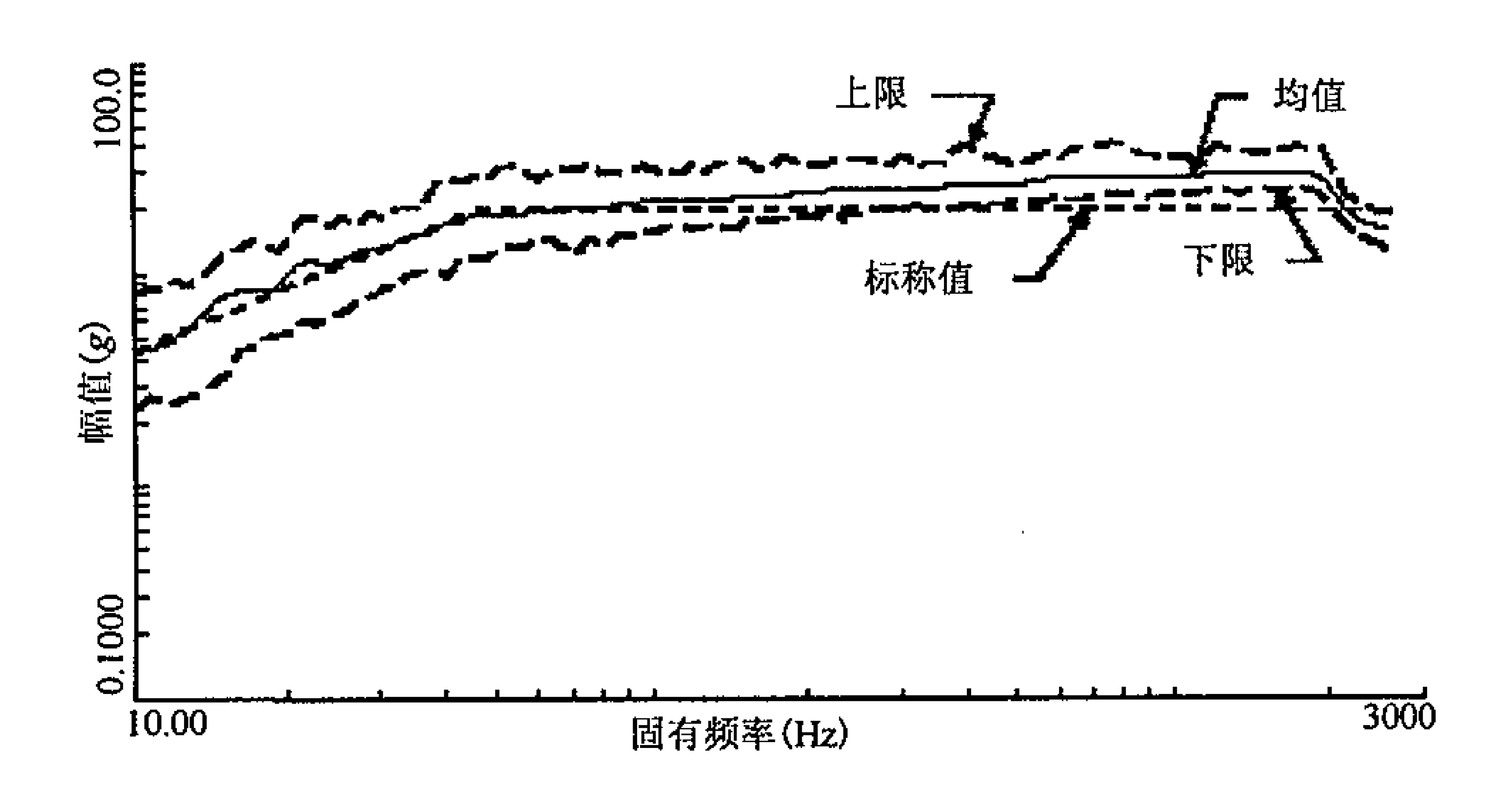


图 D.4　飞行器设备功能性试验的冲击响应谱比较